



**Ana Catarina
Fernandes Carrilho**

**Morfodinâmica e transporte sedimentar longitudinal
na Praia de Mira**



**Ana Catarina
Fernandes Carrilho**

**Morfodinâmica e transporte sedimentar longitudinal
na Praia de Mira**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação do Prof. Doutor Paulo Manuel Cruz Alves da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e Prof. Doutor Paulo Renato Enes Baganha Batista, Estagiário de Pós-Doutoramento.

o júri

Presidente

Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professora Associada, Universidade de Aveiro

Doutor Francisco Eduardo da Ponte Sancho
Investigador Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Professor Doutor Carlos Daniel Borges Coelho
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço ao meu orientador científico, Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, por todo o conhecimento que me transmitiu ao longo deste último ano, pela disponibilidade, pelo apoio e pelas críticas construtivas que me fizeram evoluir.

Ao Prof. Doutor Paulo Silva e ao Prof. Doutor Paulo Batista, do Departamento de Física e do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro respetivamente, agradeço o apoio, a disponibilidade e os esclarecimentos prestados que contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Hugo Domingues, agradeço a ajuda prestada com o programa Matlab.

Ao Fábio Ribeiro e ao Bruno Filipe agradeço todo o apoio, companheirismo, trocas de informação e amizade.

Aos meus amigos e colegas, agradeço todas as palavras de incentivo.

Por fim, dirijo um agradecimento muito especial aos meus pais e irmã, por todo o apoio, incentivo, e por acreditarem sempre em mim.

A todos os mencionados e aqueles que não mencionei fica aqui a minha sincera gratidão.

palavras-chave

Morfodinâmica, deriva litoral, caudal sólido em suspensão, ondas, Praia de Mira.

resumo

As ondas, à medida que se aproximam das zonas costeiras vão sofrendo transformações e juntamente com as correntes marítimas provocam transporte sedimentar e alterações morfológicas na costa.

O presente documento teve como principal objetivo estudar a morfodinâmica e o transporte sedimentar longitudinal na Praia de Mira. Para atingir estes objetivos foram efetuadas duas campanhas de campo na Praia de Mira, onde foram recolhidos dados que permitiram determinar o caudal sólido e analisar as variações volumétricas que a praia sofreu entre ciclos de maré sucessivos.

Para poder analisar os dados adquiridos foi primeiramente necessário realizar uma revisão bibliográfica sobre a hidrodinâmica marítima e o transporte sedimentar, e sobre as principais características da zona de estudo. Posteriormente foram analisados os dados recolhidos por cada equipamento de medição e determinado o caudal sólido transportado.

Desta análise pode-se constatar que em ambas as campanhas de campo existiu transporte longitudinal na direção norte-sul, sendo que o seu valor na primeira campanha de campo foi superior ao da segunda. Segundo a análise da variação volumétrica ocorreu acreção em ambas as campanhas de campo.

keywords

Morphodynamics, coastal drift, suspended transport, waves, Praia de Mira

abstract

When the wind acts on a body of water, it causes the formation of waves, and, as it approaches the coastal areas, suffers transformations which, along with ocean currents, then cause sediment transport and morphological changes in the shoreline.

This document aims to study the morphodynamics and the longshore sediment transport at Praia de Mira. To achieve these goals, two field campaigns were carried out at Praia de Mira, where collected data allowed to determine the solid flow and analyse the volumetric variations that the beach suffered between succeed cycles.

In order to analyse the acquired data, it was first necessary the review of literature about marine hydrodynamics and sediment transport, as well as the main characteristics of the study area. The collected data by each measuring equipment was later analysed and the solid flow transported was determined.

From this analysis it can be seen that in both field campaigns there was longitudinal transport in a north-south direction, and the amount of transport that occurred in the first field campaign was superior to the second. According to the analysis of volumetric variation, accretion occurred in both field campaigns.

Índice geral

Índice geral	I
Índice de figuras	III
Índice de tabelas.....	VII
Lista de símbolos.....	IX
1. Introdução.....	3
1.1. Enquadramento	3
1.2. Objetivos	3
1.3. Guia de leitura	4
2. Hidrodinâmica marítima e dinâmica sedimentar	9
2.1. Propagação das ondas	9
2.2. Transporte longitudinal de sedimentos	13
2.2.1. Componente por arrastamento no fundo.....	14
2.2.2. Componente em suspensão.....	15
2.3. Formulações de transporte longitudinal sólido	17
2.3.1. Fórmula de CERC	17
2.3.2. Fórmula de Kamphuis	19
2.4. Alterações morfológicas na superfície da praia	20
3. Zona de estudo	27
3.1. Localização	27
3.2. Hidrodinâmica e transporte sedimentar.....	27
3.3. Equipamentos de medição de parâmetros hidrodinâmicos	28
3.3.1. Transdutor de pressão (PT).....	29
3.3.2. Correntómetro eletromagnético (ECM)	30
3.3.3. Sensor ótico (OBS)	31
3.4. Sistema de Elevada Resolução Espacial.....	34
3.5. Campanhas de campo.....	34

3.5.1.	Descrição das campanhas de campo	35
3.5.2.	Altura de influência de cada OBS na coluna de água.....	37
4.	Análise de resultados	41
4.1.	Altura total da coluna de água	41
4.1.1.	Registos.....	41
4.1.2.	Marés	44
4.1.3.	Altura, período e direção da ondulação	44
4.1.4.	Profundidade de rebentação	47
4.2.	Velocidades da corrente	47
4.3.	Concentração de sedimentos em suspensão.....	51
5.	Caudal sólido em suspensão	59
5.1.	Análise do caudal sólido em suspensão medido nas campanhas.....	59
5.1.1.	Caudais instantâneos.....	59
5.1.2.	Caudais instantâneos em função da altura de influência dos OBS ..	63
5.1.3.	Caudais instantâneos integrados em toda a coluna de água.....	67
5.1.4.	Caudais totais no ciclo de maré.....	72
5.2.	Caudais sólidos obtidos através da aplicação de formulações.....	73
5.2.1.	CERC.....	74
5.2.2.	Kamphuis.....	75
6.	Morfologia da praia emersa.....	79
6.1.	Campanha do dia 18/11/2013	80
6.2.	Campanha do dia 15/04/2014	86
7.	Conclusão.....	95
7.1.	Considerações finais	95
7.2.	Desenvolvimentos futuros	98
	Referências bibliográficas	99

Índice de figuras

Capítulo II

Figura 2.1 - Tipos de rebentação (adaptado de Hedges, 2013)	11
Figura 2.2 - Zonas de transformação das ondas em praias naturais (adaptado de Svendsen <i>et al.</i> , 1978)	12
Figura 2.3 - Esquema da distribuição transversal do transporte longitudinal de sedimentos (Coelho, 2005)	14
Figura 2.4 - Caudal em suspensão, Q_s (adaptado de Camenen e Larson, 2007)	16

Capítulo III

Figura 3.1 - Localização da zona de estudo (retirado do Google Earth)	27
Figura 3.2 - Transdutor de pressão Level Troll 500	29
Figura 3.3 - Correntómetro eletromagnético Infinity	30
Figura 3.4 - Sensor ótico, Campbell OBS3 (Downing, 2008)	31
Figura 3.5 - Calibração dos OBS	32
Figura 3.6 - Retas de calibração dos OBS	33
Figura 3.7 - Imagem do Sistema Integrado de Elevada Resolução Espacial, montado num quadriciclo (adaptado de Batista <i>et al.</i> , 2011)	34
Figura 3.8 - Instalação de equipamentos e registo topográfico da praia	36
Figura 3.9 - Posicionamento dos instrumentos da primeira campanha de campo ..	37
Figura 3.10 - Posição inicial dos equipamentos na coluna de água	38

Capítulo IV

Figura 4.1 - Altura total da coluna de água ao longo do tempo da campanha	42
Figura 4.2 - Altura da coluna de água (h) e altura significativa da onda (H_s) ao longo do tempo	43
Figura 4.3 - Altura significativa da onda e altura máxima registadas pela boia do ondógrafo de Leixões (IH, 2014)	45
Figura 4.4 - Período de pico das ondas (T_p) e período médio das ondas (T_z) registadas pela boia do ondógrafo de Leixões (IH, 2014)	46
Figura 4.5 - Direção da ondulação registada pela boia do ondógrafo de Leixões (IH, 2014)	46

Figura 4.6 - Bússola para medição do ângulo entre o sensor de temperatura do ECM e o norte.....	49
Figura 4.7 - Velocidades da corrente registadas durante as campanhas.....	50
Figura 4.8 - Média do ângulo de incidência da onda e das velocidades a cada intervalo de dez minutos.....	51
Figura 4.9 - Valores de concentração dos sedimentos em suspensão. O OBS1 encontra-se representado a azul claro, o OBS2 a azul escuro e o OBS3 a preto	52
Figura 4.10 - Concentração de sedimentos em suspensão ao longo das campanhas	54
Figura 4.11 - Médias de dez minutos da altura significativa de onda versus concentração de sedimentos	55

Capítulo IV

Figura 5.1 - Caudal sólido instantâneo em suspensão, na primeira campanha.....	60
Figura 5.2 - Caudal sólido instantâneo em suspensão, na segunda campanha	61
Figura 5.3 - Média a cada dez minutos do caudal sólido em função da altura da coluna de água na primeira campanha.....	62
Figura 5.4 - Média do caudal sólido em função da altura da coluna de água a cada dez minutos na segunda campanha.....	63
Figura 5.5 - Caudais instantâneos em função da altura de influência de cada OBS (primeira campanha)	65
Figura 5.6 - Caudais instantâneos em função da altura de influência de cada OBS (segunda campanha)	66
Figura 5.7 - Caudais totais, no ciclo de maré da primeira campanha	67
Figura 5.8 - Caudais totais, no ciclo de maré da segunda campanha	68
Figura 5.9 - Média a cada dez minutos do caudal integrado na coluna de água na primeira campanha	69
Figura 5.10 - Média a cada dez minutos do caudal integrado na coluna de água na segunda campanha.....	70
Figura 5.11 - Caudal sólido longitudinal, em função da posição do ciclo de maré..	71
Figura 5.12 - Caudal sólido transversal, em função da posição do ciclo de maré ...	71

Capítulo VI

Figura 6.1 - Determinação do volume entre duas superfícies (adaptado de Autodesk, 2014).....	79
Figura 6.2 - Volume formado por superfícies do tipo grelha	80
Figura 6.3 - Superfícies da Praia de Mira (campanha do dia 18/11/2013). As linhas a vermelho representam a área delimitada pelo método interpolador, a preto representam os contornos das superfícies levantadas e a cinzento as curvas de nível de 2 em 2 m. A cor verde representa a acreção e a vermelho são representados os locais onde ocorreu erosão	81
Figura 6.4 - Divisão da área de estudo (campanha do dia 18/11/2013)	82
Figura 6.5 - Perfis transversais da praia (campanha do dia 18/11/2013). O vermelho representa a superfície antes do ciclo de maré e o preto representa a superfície após o ciclo de maré.....	85
Figura 6.6 - Superfícies da Praia de Mira (campanha do dia 18/11/2013). As linhas a vermelho representam a área delimitada pelo método interpolador, a preto representam os contornos das superfícies levantadas e a cinzento as curvas de nível de 2 em 2 m.....	87
Figura 6.7 - Divisão da área de estudo (campanha do dia 15/04/2014)	88
Figura 6.8 - Perfis transversais da praia (campanha do dia 15/04/2014). O vermelho representa a superfície antes do ciclo de maré e o preto representa a superfície após o ciclo de maré.....	91

Índice de tabelas

Capítulo III

Tabela 3.1 - Previsão da maré astronómica para Aveiro (IH, 2014)	35
--	----

Capítulo IV

Tabela 5.1 - Caudal sólido calculado nas campanhas de campo	72
Tabela 5.2 - Caudal sólido estimado para o total das campanhas de campo	73
Tabela 5.3 - Caudais sólidos longitudinais determinados através da fórmula de CERC	74
Tabela 5.4 - Caudais sólidos determinados através da fórmula de Kamphuis.....	76

Capítulo VI

Tabela 6.1 - Volumes de acreção e de erosão (campanha do dia 18/11/2013)	81
Tabela 6.2 - Volume de erosão e acreção divididos por trechos longitudinais (primeira campanha)	83
Tabela 6.3 - Volumes de erosão e acreção divididos por trechos transversais (campanha do dia 18/11/2013).....	83
Tabela 6.4 - Volumes de erosão e acreção (campanha do dia 15/04/2014)	87
Tabela 6.5 - Volumes de erosão e acreção divididos por trechos longitudinais (campanha do dia 15/04/2014).....	89
Tabela 6.6 - Método das triangulações para cada secção	90

Lista de símbolos

C_{obs}	Concentração dos sedimentos registada pelos OBS	(kg/m ³)
H	Altura da onda	(m)
H_b	Altura da onda na rebentação	(m)
H_s	Altura significativa da onda	(m)
L	Comprimento de onda	(m)
L_0	Comprimento de onda ao largo	(m)
Q	Taxa de transporte longitudinal de sedimentos	(m ³ /ano)
Q_s	Caudal de sedimentos em suspensão	(kg/m)
T_p	Período de pico da onda	(s)
T_z	Período médio das ondas	(s)
V	Velocidade média da corrente longitudinal que atua na zona de rebentação	(m/s)
V_{xI}	Componente da velocidade longitudinal calibrada	(m/s)
V_{yI}	Componente da velocidade transversal calibrada	(m/s)
c	Concentração de sedimentos em suspensão	(kg/m ³)
d_{50}	Diâmetro mediano do grão	(mm)
g	Aceleração da gravidade	(m/s ²)
h	Altura total da coluna de água	(m)
h_b	Profundidade de rebentação	(m)
k	Coefficiente empírico	
m	Declive da praia	
n	Porosidade dos sedimentos	
t	Tempo	(s)
u_{mb}	Amplitude da velocidade orbital	(m/s)
w_s	Velocidade de queda dos sedimentos	(m/s)
z_a	Altura do transporte por arrastamento	(m)
α_b	Ângulo da onda na rebentação	(°)
β	Constante de calibração	
γ_b	Índice de rebentação	
ξ_{sb}	Número de Iribarren	
ρ	Massa volúmica da água do mar	(kg/m ³)
ρ_s	Massa volúmica da areia	(kg/m ³)

Capítulo I

Introdução

1. Introdução

Neste capítulo faz-se um pequeno enquadramento do tema em estudo, sendo de seguida enunciados os objetivos do trabalho, e por fim apresenta-se uma breve descrição da organização deste documento.

1.1. Enquadramento

Segundo Fortunato *et al.* (2008), a morfologia do litoral é o resultado visível da dinâmica sedimentar, isto é, das trocas de sedimentos que ocorrem dentro de cada unidade morfo-sedimentar e através das suas fronteiras. Estas trocas ou fluxos de sedimentos são, por sua vez, forçadas pelos agentes ou ações dinâmicas intervenientes na zona costeira, dos quais as mais importantes são: a agitação marítima, as correntes de maré, o vento, as correntes litorais e o caudal fluvial (em embocaduras).

A importância relativa destes agentes varia de local para local, no entanto é comum a forte predominância da ação de marés em estuários, e da agitação marítima e das correntes litorais em costas oceânicas abertas. Por outro lado, o transporte de sedimentos médio anual em qualquer zona costeira resulta do efeito acumulado dos transportes associados aos vários agentes, que variam ao longo do tempo, com realce para a possibilidade de, por vezes (*e.g.*, durante tempestades marítimas), poderem ocorrer alterações morfológicas rápidas e significativas (Fortunato *et al.*, 2008).

Os trabalhos de campo para monitorização da variação morfológica, granulométrica e hidrodinâmica de um determinado local, ajudam a aumentar o conhecimento sobre os processos costeiros. Assim, a Praia de Mira foi selecionada como objeto de monitorização para representar o comportamento dos processos morfodinâmicos e da dinâmica sedimentar no litoral da Zona Centro.

1.2. Objetivos

Este trabalho teve como principal objetivo caracterizar a Praia de Mira e aumentar o conhecimento sobre a quantificação do transporte sedimentar longitudinal neste

local. Assim, para recolher informação topográfica, granulométrica e sobre as variáveis hidrodinâmicas intervenientes nos processos de transporte sólido, realizaram-se campanhas de campo nesta praia.

Complementarmente realizou-se uma revisão bibliográfica de formulações que quantificam a componente longitudinal do transporte sedimentar, com especial ênfase na parcela de sedimentos em suspensão (formulações numéricas). Para atingir estes objetivos estimou-se o transporte sedimentar com base nas concentrações de sedimentos em suspensão e nas velocidades de corrente, medidas respetivamente com sensor ótico (OBS) e correntómetro eletromagnético (ECM), avaliou-se as alturas de onda recorrendo a um transdutor de pressão (PT) e, analisou-se a dimensão dos sedimentos das amostras de areia. O transporte sedimentar foi também estimado com base em diferentes formulações empíricas.

Pretendeu-se avaliar as expressões mais adequadas aos resultados obtidos e quantificar a variação volumétrica da praia entre o início e o final das campanhas, com base nos levantamentos topográficos realizados.

1.3. Guia de leitura

O presente documento encontra-se dividido em sete capítulos. No primeiro capítulo é realizada uma breve introdução ao tema do trabalho e são apresentados os principais objetivos a atingir.

No segundo capítulo, aborda-se o tema da hidrodinâmica marítima e dinâmica sedimentar, no qual se apresenta uma revisão bibliográfica sobre as ondas, o transporte sedimentar longitudinal em suspensão e por arrastamento no fundo, formulações para a determinação do caudal sólido transportado longitudinalmente e, os diversos métodos que existem para determinar as alterações morfológicas numa praia.

Segue-se o terceiro capítulo, onde se apresenta a zona de estudo, sendo realizada uma revisão bibliográfica sobre a hidrodinâmica e transporte sedimentar deste local.

De seguida os equipamentos de medição utilizados nas campanhas de campo são apresentados, e por fim são descritas as campanhas de campo.

A análise dos resultados adquiridos pelos instrumentos de medição nas campanhas de campo encontra-se descrita no quarto capítulo, sendo primeiramente realizada uma análise da altura total da coluna de água, seguindo-se as velocidades de corrente e por fim, a concentração de sedimentos em suspensão.

No quinto capítulo apresenta-se uma análise do caudal sólido em suspensão, onde são apresentados os resultados obtidos nas campanhas de campo e os resultados obtidos através de formulações numéricas, sendo, por fim realizada uma comparação entre estes.

O sexto capítulo apresenta a morfologia da zona emersa da Praia de Mira antes e depois de cada campanha de campo, onde são analisadas as variações volumétricas entre cada ciclo de maré.

Por fim, o sétimo capítulo resume as principais conclusões do trabalho e apresenta sugestões para desenvolvimentos futuros.

Capítulo II

Hidrodinâmica marítima
e dinâmica sedimentar

2. Hidrodinâmica marítima e dinâmica sedimentar

Neste capítulo é realizado um enquadramento teórico, onde são enunciados alguns dos fenómenos que ocorrem durante a propagação das ondas na sua aproximação à praia. De seguida, apresenta-se uma breve descrição dos processos de transporte longitudinal de sedimentos, sendo inicialmente descrito o transporte por arrastamento e posteriormente o transporte em suspensão. Apresenta-se também o método utilizado para determinar os volumes de acreção ou de erosão numa praia e, por fim são enunciadas algumas formulações numéricas que permitem estimar o caudal sólido transportado pela corrente longitudinal.

2.1. Propagação das ondas

No oceano, as ondas são formadas através de perturbações da superfície livre da água, induzidas principalmente pelo vento através da transferência de energia para a massa de água. Segundo Wright e Short (1984), as ondas representam a principal fonte de energia para os sistemas das praias. A variabilidade morfológica desses sistemas depende diretamente da variabilidade do clima de agitação marítima.

No processo de propagação da ondulação em direção às zonas costeiras ocorrem modificações na forma da onda que resultam do processo de interação com o fundo. De seguida são enunciados algumas modificações sofridas pela onda.

Refração

Segundo Kamphuis (2000), durante a refração, as cristas das ondas tendem a alinhar-se com as curvas de nível do fundo (batimétricas), e a direção de propagação da onda torna-se mais perpendicular à costa. Para entender o processo de refração, considere-se como exemplo um conjunto de ondas planas que se aproximam da costa com um determinado ângulo. À medida que a profundidade diminui, a velocidade de fase das ondas diminui, a crista da onda curva e fica mais paralela às curvas de nível do fundo.

Empolamento

O empolamento, ocorre quando uma onda se aproxima de uma praia, pois à medida que a profundidade diminui, o comprimento de onda vai diminuindo como consequência da diminuição da velocidade de propagação e, por conservação do fluxo de energia da onda a sua altura vai aumentando (Coelho, 2005).

Rebentação

Uma onda torna-se instável e rebenta quando a profundidade é inferior a um determinado valor da altura da onda. Uma das expressões mais utilizadas para determinar este ponto de instabilidade é a Equação 2.1, onde h_b corresponde à profundidade de rebentação e H_b à altura da onda na rebentação.

$$h_b = \frac{H_b}{0.78} \quad (2.1)$$

Esta expressão é utilizada com frequência em aplicações da engenharia costeira (Coelho, 2005). No entanto, a relação entre h_b e H_b , também é dependente da inclinação do fundo e do comprimento de onda, existindo formulações mais complexas que fazem intervir estes parâmetros.

Segundo Kamphuis (2000), as ondas quando rebentam podem adquirir diversas formas. O tipo de rebentação depende do declive da praia (m) e da declividade da onda (H/L) que são representadas pelo parâmetro de rebentação (ξ_b), também conhecido como número de *Iribarren*, definido por:

$$\xi_b = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}} \quad (2.2)$$

Na Equação 2.2 L_0 representa o comprimento de onda ao largo. Na Figura 2.1 podem ser observados os quatro tipos de rebentação mais comuns. A rebentação progressiva ocorre quando $\xi_b < 0.5$, em praias de declive ligeiro. Este tipo de rebentação é caracterizado pelo crescimento gradual da onda até que a crista se torna instável, resultando num avanço progressivo e suave da crista da onda (Aagaard e Masselink, 1999).

A rebentação mergulhante acontece em praias mais íngremes, quando $0.5 < \xi_b < 2.5$. Como o nome indica, a crista da onda antecipa-se ao corpo da onda e mergulha violentamente para a frente (Kamphuis, 2000).

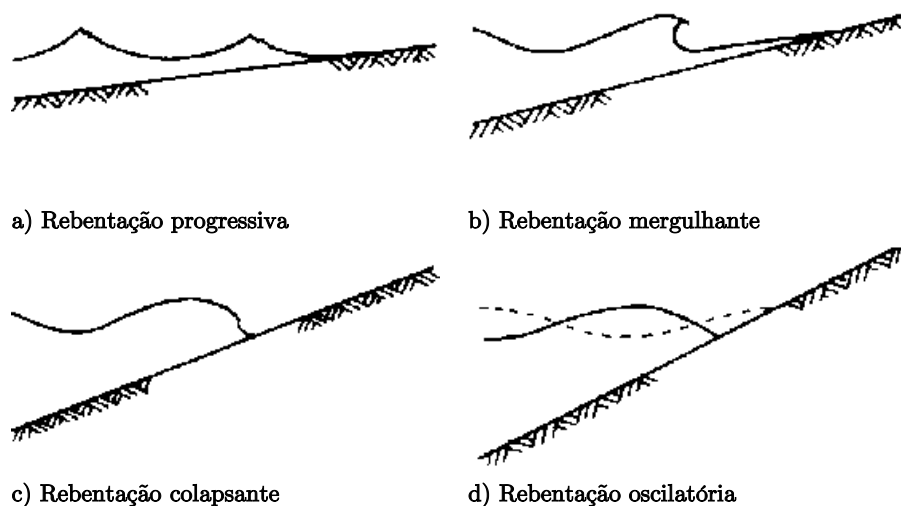


Figura 2.1 - Tipos de rebentação (adaptado de Hedges, 2013)

A rebentação colapsante ocorre em praias íngremes, quando $2.5 < \xi_b < 3.7$. Neste tipo de rebentação, apenas a parte inferior da face dianteira da onda se torna vertical e é empurrada para a frente mergulhando num movimento ondulatório (Aagaard e Masselink, 1999)

Denomina-se rebentação oscilatória quando, a face frontal e a crista da onda permanecem relativamente inalteráveis e a onda desliza diretamente para cima da praia, este tipo de rebentação ocorre em praias muito íngremes para $\xi_b > 3.7$ (Aagaard e Masselink, 1999).

Espraio

O movimento induzido pelas ondas que faz com que a água se movimente para a frente e para trás na face da praia, é conhecido como espraio e divide-se em duas componentes: uma sobrelevação quase constante do nível da água denominado *setup* e, oscilações sobre este nível denominadas espraio (Hughes e Turner, 1999).

Reflexão

A reflexão das ondas de superfície em meio fluido obedece às leis gerais de reflexão de outros tipos de ondas noutros meios contínuos. Assim, o ângulo de reflexão de uma onda deverá ser igual ao ângulo de incidência. As ondas refletidas podem interferir com as ondas incidentes, gerando um esquema bidimensional ou tridimensional de interferência. No caso de uma incidência normal a um obstáculo vertical resultará numa reflexão total, com a formação de “clapotis” ou ondas estacionárias. Se as ondas incidirem num plano inclinado, a reflexão da onda será parcial. As características do obstáculo refletor (por exemplo, a inclinação e a rugosidade) vão influenciar o nível de dissipação de energia na reflexão (Coelho, 2005).

Segundo Svendsen *et al.* (1978) e Aagaard e Masselink (1999), o plano inclinado de uma praia pode ser dividido em quatro zonas hidrodinâmicas, com base nas diferentes fases de transformação da onda, como pode ser observado na Figura 2.2: (1) a zona de empolamento das ondas, associada à redução da profundidade; (2) a zona de rebentação externa, onde rebentam as maiores ondas; (3) a zona de rebentação interna, onde a maior parte das ondas rebenta ou já rebentou; e (4) a zona de espraio, onde as ondas que já rebentaram, colapsam sobre a face de praia.

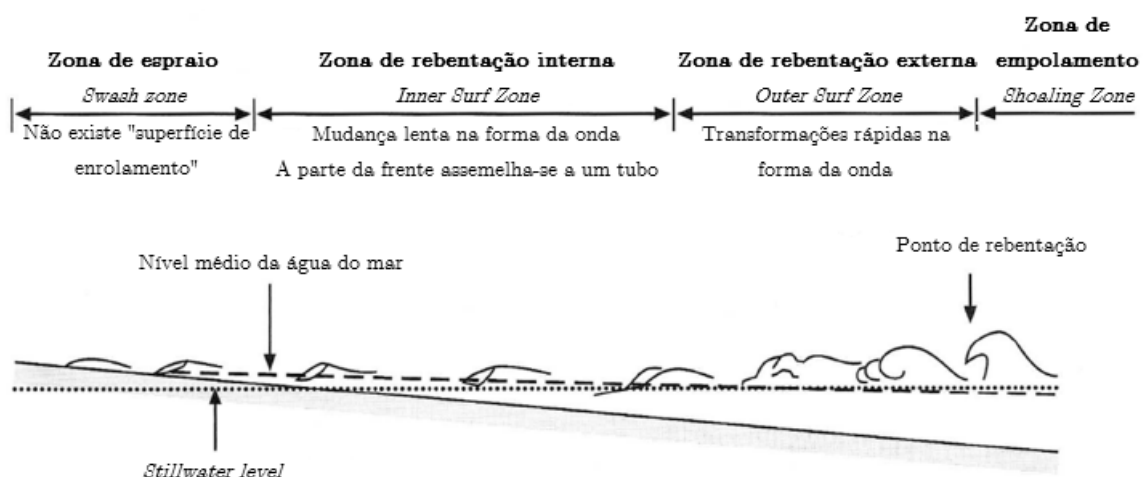


Figura 2.2 - Zonas de transformação das ondas em praias naturais (adaptado de Svendsen *et al.*, 1978)

As correntes na zona de rebentação são definidas como correntes geradas pela ação das ondas e são originadas quase exclusivamente pela dissipação da energia destas

quando rebentam. O transporte de massa líquida que existe perto da costa devido à assimetria das ondas incidentes e dos fluxos de maré é geralmente de menor importância em termos de velocidade e de capacidade de transporte de sedimentos em comparação com as correntes da zona de rebentação. Existem três tipos de correntes na zona de rebentação: correntes de fundo (*undertow*), as correntes de retorno (agueiros) e as correntes longitudinais (Aagaard e Masselink, 1999).

Neste documento é dada maior relevância às correntes longitudinais que ocorrem na direção paralela à costa. Estas correntes podem atingir velocidades superiores a 1.5 m/s, e são importantes agentes do transporte sedimentar, estando ainda associadas com problemas de erosão em praias com grandes extensões (Aagaard e Masselink, 1999).

2.2. Transporte longitudinal de sedimentos

A direção de incidência das ondas numa praia tem um impacto direto no transporte sedimentar longitudinal. Uma configuração de costa que apresente um desvio relativamente ao seu traçado de equilíbrio tende a modificar a sua forma para convergir para esse traçado, minimizando o transporte longitudinal. Não existindo alimentação sedimentar, a linha de costa pode alterar a sua orientação até se posicionar paralelamente à direção das cristas das ondas incidentes (Pereira, 2004).

O transporte de sedimentos numa praia dá-se maioritariamente devido à combinação de vários padrões de correntes verticais e horizontais, essencialmente na zona de rebentação. Algumas vezes, este transporte resulta apenas no rearranjo da posição da areia, noutras alturas existe um extenso deslocamento litoral de sedimentos. O transporte longitudinal de sedimentos está entre os principais processos que controlam a morfologia de uma praia a larga escala e determinam se ocorre erosão, sedimentação ou se existe estabilidade (Rosati *et al.*, 2002).

Durante o processo de rebentação, a turbulência associada faz com que alguns dos sedimentos do fundo do mar sejam postos em suspensão. Estes sedimentos em

suspensão e parte dos sedimentos do fundo do mar são transportados ao longo da faixa costeira pela corrente longitudinal e têm uma distribuição típica como ilustra a Figura 2.3, que atinge um pico de transporte perto da zona de rebentação. Os dois modos de transporte são definidos como transporte referidos por arrastamento e transporte em suspensão, sendo a soma destes dois transportes a deriva litoral (Mangor, 2004).

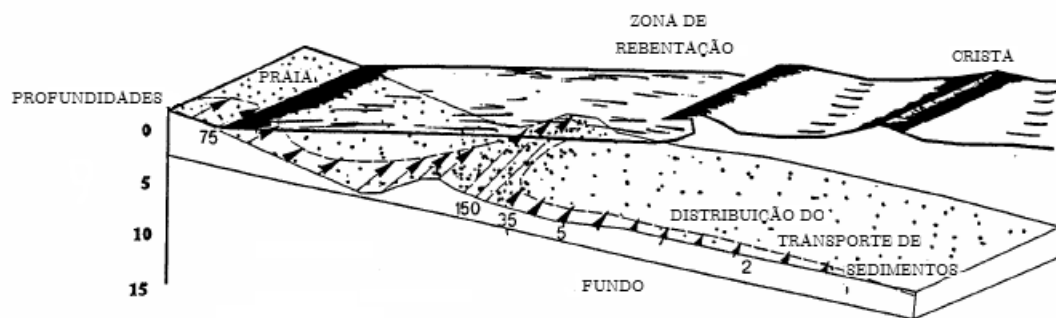


Figura 2.3 - Esquema da distribuição transversal do transporte longitudinal de sedimentos (Coelho, 2005)

Resumidamente, Castanho (1966) refere que o transporte sólido longitudinal consiste no encaminhamento longitudinal dos sedimentos costeiros por ação de ventos, ondas e correntes longitudinais. Este tipo de transporte é tipicamente unidirecional ou pelo menos, quando existe bidirecionalidade, apresenta uma resultante de transporte com sentido predominante, perfeitamente definido.

Como já foi enunciado, o transporte longitudinal dos sedimentos pode ser dividido em transporte por arrastamento e transporte em suspensão. Algumas das teorias existentes, principalmente as primeiras a ser elaboradas, tiveram por base o conhecimento já existente no transporte sedimentar fluvial, como de seguida pode ser observado.

2.2.1. Componente por arrastamento no fundo

O transporte por arrastamento no fundo é caracterizado pelo movimento das partículas junto ao fundo através de rolamento, deslizamento e saltos. Einstein (1950), define este tipo de transporte como sendo aquele dentro de uma fina camada, com espessura igual a duas vezes o diâmetro da partícula média, próximo

ao fundo e dentro do qual as partículas rolam, deslizam e saltam por distâncias correspondentes a alguns diâmetros da partícula média considerada. Dentro desta fina camada os níveis de turbulência são tão pequenos que se torna praticamente impossível as partículas entrarem em suspensão.

Bagnold (1966), por sua vez, definiu este tipo de transporte como sendo aquele em que o contacto sucessivo das partículas com o fundo é estritamente determinado pelos efeitos da gravidade. O movimento típico que caracteriza o transporte por arrastamento no fundo é o movimento por saltos. Abbott e Francis (1977), detalharam experimentalmente as características desse tipo de movimento. Segundo estes autores, o transporte por saltos ocorre dentro de uma camada com espessura máxima de ordem de dez diâmetros da partícula (d_{50}), com o movimento das partículas totalmente dominado pelas forças gravitacionais, embora o início do movimento destas partículas possa ocorrer por conta de impulsos turbulentos e instantâneos, principalmente em virtude do aparecimento de forças dirigidas para cima a partir do fundo, oriundas de tensões de corte relacionadas com os gradientes de velocidade registados nesta região.

2.2.2. Componente em suspensão

Com o aumento do valor da velocidade do escoamento, a tensão de atrito no fundo ultrapassa o valor da velocidade de queda da partícula e esta é lançada para cima, para um nível onde as componentes verticais dos movimentos turbulentos têm um valor igual ou superior ao seu peso próprio submerso, ficando assim a partícula em suspensão. A incorporação de sedimentos na coluna de água por ação de correntes é mais importante quando o fluxo ocorre sobre um fundo ondulado, já que o deslocamento do fluxo, provocado pelas ondulações dá origem ao aparecimento de importantes vórtices a jusante da crista, responsáveis pela mobilização local de grandes quantidades de sedimentos (Fontoura, 2004).

No caso em que ocorre rebentação, a onda provoca o aparecimento de uma região de intenso movimento rotacional da água, de tal forma que os turbilhões ali formados interagem com o fundo e capturam as partículas de sedimentos

lançando-as na coluna de água. Estes sedimentos mobilizados pela rebentação da onda são os responsáveis pela elevada taxa de concentração de sedimentos em suspensão e transporte sedimentar encontradas na zona de rebentação. O presente documento foca-se principalmente nesta componente de transporte longitudinal sedimentar. De acordo com Van Rijn (1990), as ondas do tipo mergulhante provocam a suspensão de uma quantidade de sedimentos dez vezes maior do que aquelas que têm uma rebentação do tipo progressiva.

Segundo Camenen e Larson (2007), a abordagem tradicionalmente utilizada para calcular o transporte de sedimentos em suspensão Q_s (Equação 2.3), que pode ser observada na Figura 2.4, é determinada através da distribuição vertical da concentração dos sedimentos em suspensão (c) e da velocidade (v), realizando o produto entre estas duas quantidades e integrando-o verticalmente entre o topo da linha do caudal sólido transportado por arrastamento ($z=z_a$) e a superfície livre da coluna de água ($z=h$).

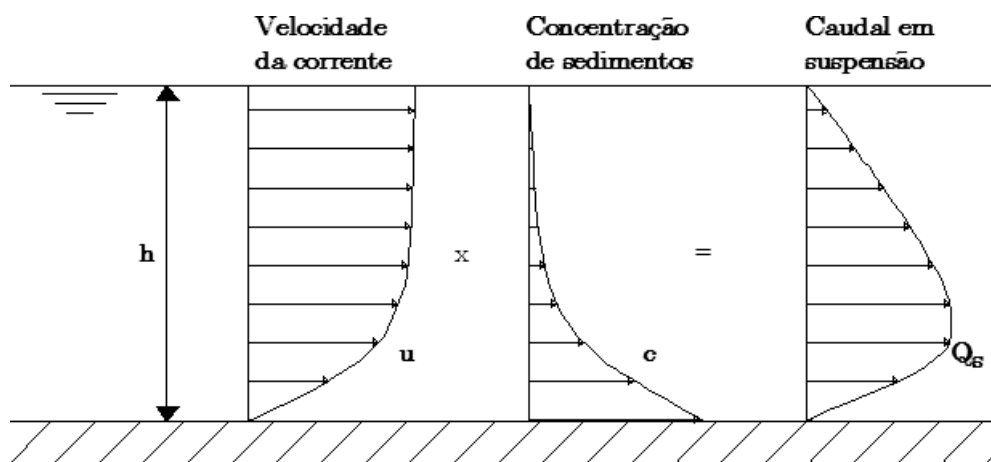


Figura 2.4 - Caudal em suspensão, Q_s (adaptado de Camenen e Larson, 2007)

$$Q_s(t) = \int_{z_a}^h v(z,t)c(z,t)dz \quad (2.3)$$

Na equação, $Q_s(t)$ representa o caudal sólido médio instantâneo dos sedimentos em suspensão por unidade de largura, $v(z,t)$ e $c(z,t)$ são respetivamente, a velocidade horizontal e a concentração volumétrica de sedimentos em altura. Portanto, uma estimativa apurada do caudal em suspensão requer uma previsão dos perfis

instantâneos no tempo da velocidade da corrente e da concentração dos sedimentos em suspensão (Camenen e Larson, 2007).

2.3. Formulações de transporte longitudinal sólido

O balanço sedimentar a longo prazo de uma faixa costeira é frequentemente determinado através de pequenos gradientes do movimento longitudinal de sedimentos nas correntes da zona de rebentação. A avaliação da taxa de transporte longitudinal de sedimentos é também um pré-requisito para o dimensionamento de alimentações artificiais, esporões, ou outras intervenções de engenharia. Simples abordagens empíricas como as formulações do CERC (USACE, 1984) e de Kamphuis (Kamphuis, 1991) podem ser utilizadas para determinar espacialmente e integrando no tempo o valor da taxa total do transporte sedimentar longitudinal. Contudo, a sua aplicação, frequentemente requer pequenos ajustes em parâmetros específicos da estimativa do caudal total (parâmetro de calibração da formulação ao local de estudo) o que pode ser feito, por exemplo, recorrendo a medições do transporte com armadilhas de sedimentos, sensores óticos e correntómetros eletromagnéticos e à combinação destas técnicas. Estudos mais detalhados para prever a taxa de transporte sedimentar combinam informação sobre a variação temporal do fluxo de sedimentos ao longo da costa. Estas previsões requerem modelos numéricos de transformação das ondas, das correntes induzidas pelas ondas e da concentração de sedimentos (Maanen *et al.*, 2009).

2.3.1. Fórmula de CERC

Segundo Ari Güner *et al.* (2013), a fórmula mais utilizada para estimar a taxa total de transporte longitudinal, que atravessa determinada secção transversal, é conhecida como a equação de CERC (USACE, 1984). Esta equação considera que o transporte longitudinal é proporcional ao fluxo de energia das ondas, avaliado na zona de rebentação, através de um coeficiente empírico adimensional (k). Assim, segundo Zhang *et al.* (2013), considerando os valores que caracterizam a onda na

zona de rebentação e, utilizando a altura significativa de onda, a taxa longitudinal de transporte sedimentar (expressa em m³/s) é calculada através da Equação 2.4:

$$Q = k \frac{\rho g^{1/2}}{16\sqrt{\gamma_b}(\rho_s - \rho)(1 - n)} H_b^{5/2} \sin(2\alpha_b) \quad (2.4)$$

onde, k é um coeficiente empírico, ρ_s é a massa volúmica da areia (considerado 2650 kg/m³), ρ é massa volúmica da água salgada (considerada 1025 kg/m³), g corresponde à aceleração da gravidade (9.81 m/s²), γ_b é o índice de rebentação que, de acordo com a Equação 2.1 se admitiu igual a 0.78, n é a porosidade dos sedimentos admitida igual a 40% de vazios ($n=0.4$), H_b é a altura significativa da onda na rebentação e α_b é o ângulo da onda na rebentação.

Segundo Komar e Inman (1970), o coeficiente k foi primeiramente determinado através de uma regressão linear baseada em medições de transporte sedimentar, tendo sido obtido o valor de $k=0.77$ (considerando alturas médias quadráticas de onda na rebentação). Posteriormente, alguns conjuntos de dados foram adicionados e o valor de k foi atualizado para 0.39 (utilizando a altura significativa de onda na rebentação). Contudo, alguns dados analisados sobre o transporte de sedimentos mostram que, existia uma considerável dispersão na aplicação da fórmula de CERC, o que sugeriu que k dependesse de outros parâmetros físicos.

Kamphuis e Readshaw (1978), observaram a relação entre k e o número de *Iribarren* (ξ_b) e, esta análise laboratorial sugeriu a relação $k=0.7\xi_b$, para $0.4 < \xi_b < 1.4$ (considerando alturas médias quadráticas de onda na rebentação). Fora deste intervalo nenhuma dependência de ξ_b foi registada. Esta relação sugere, que o transporte longitudinal de sedimentos aumenta à medida que mais energia é gasta no processo de rebentação, variando da rebentação progressiva até à rebentação mergulhante.

Bailard (1984), criou um modelo baseado em energia para estimar o coeficiente de transporte k . Neste modelo, k (considerando alturas médias quadráticas de onda na rebentação) foi apresentado em função do ângulo da onda na zona de rebentação e,

do rácio da magnitude da velocidade orbital e da velocidade de queda dos sedimentos (Equação 2.6).

$$k = 0.05 + 2.6 \sin^2(2\alpha_b) + 0.007 \frac{u_{mb}}{w_s} \quad (2.6)$$

Onde, $u_{mb} = 0.5 + \gamma_b \sqrt{gh_b}$ é a amplitude da velocidade orbital obtida através da teoria de ondas em águas pouco profundas, w_s representa a velocidade de queda dos sedimentos e $\gamma_b = H_b/h_b$ é o índice de rebentação.

Komar (1988), considerou que k dependia apenas do tamanho do grão. Aumentando a informação recolhida com dados do delta do rio Adra, Espanha, em que os grãos dos sedimentos têm uma gama de tamanhos que variam entre os 0.4 mm e os 1.5 mm, Valle *et al.* (1993) apresentam uma relação empírica para o parâmetro k em função do diâmetro mediano do grão (considerando alturas médias quadráticas de onda na rebentação).

$$k = 1.4e^{(-2.5d_{50})} \quad (2.7)$$

Schoonees e Theron (1994) testaram várias formulações com um grande conjunto de dados. O melhor resultado foi obtido com a formulação apresentada por Kamphuis e Readshaw (1978).

Em Smith *et al.* (2009), formulações para o coeficiente k foram avaliadas em relação a dados laboratoriais. Mais uma vez, os melhores resultados foram obtidos com o coeficiente k dependendo da rebentação sugerida em Kamphuis *et al.* (1978).

2.3.2. Fórmula de Kamphuis

Tendo como base dados de campo, Kamphuis *et al.* (1986) desenvolveram uma fórmula empírica para estimativa do transporte sólido longitudinal que inclui o

declive da praia (m) e o diâmetro mediano dos sedimentos (d_{50}), de acordo com a Equação (2.8).

$$Q = 1.28 \frac{H_b^{3.5} m}{d_{50}} \sin(2\alpha_b) \quad (2.8)$$

Com base em estudos laboratoriais e em dados de campo existentes, Kamphuis (1991) sugeriu uma fórmula empírica para a taxa de transporte total de sedimentos, modificando a fórmula de Kamphuis *et al.* (1986) com a adição da influência de período do pico da onda, T_p (Equação 2.9).

$$Q = 6.4 \times 10^4 H_b^2 T_p^{1.5} m^{0.75} d_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b) \quad (2.9)$$

Onde, Q é a taxa de transporte longitudinal de sedimentos (m^3/ano). Note-se que a dependência do diâmetro mediano dos grãos e da altura de onda na Equação 2.9 é geralmente muito reduzida em comparação com a Equação 2.8. A influência do declive da praia e do ângulo da onda incidente são também reduzidas (Wang *et al.*, 2002).

2.4. Alterações morfológicas na superfície da praia

Para estudar os processos que relacionam os eventos de temporais, com a erosão costeira e a caracterização da morfodinâmica, é importante reunir séries temporais de dados topográficos das costas arenosas. Estes dados são obtidos no âmbito de programas de monitorização. Dependendo do objetivo de cada caso de estudo, das escalas temporais e espaciais envolvidas, várias técnicas e metodologias de avaliação estão disponíveis, e estas podem ser divididas em técnicas com base aérea ou terrestre. A capacidade de cada técnica para adquirir dados de forma eficaz é importante para a geração de uma representação morfológica do terreno (Batista, 2010).

Segundo Batista *et al.* (2011), a principal informação geoespacial requerida na análise da costa arenosa diz respeito à variabilidade morfológica numa determinada área de

estudo. A variação sazonal da morfologia pode fornecer informação sobre a dinâmica da praia em termos volumétricos permitindo identificar zonas de erosão e acreção, e em termos de evolução da linha de costa, a qual é medida considerando a linha de base da duna ou de outro indicador da linha de costa, a partir da qual é possível estimar o recuo ou avanço da posição desse indicador. Portanto, procedimentos de pesquisa dedicados a este tipo de estudo devem ser capazes de determinar as coordenadas tridimensionais dos pontos do solo com uma precisão altimétrica de ordem centimétrica (preferencialmente inferior aos 5 cm) de acordo com as normas de escalas de monitorização. A necessidade de elevada precisão altimétrica visa restringir erros subsequentes no processo de interpolação das grelhas de dados (obtidos normalmente sob a forma de perfis transversais e longitudinais à linha de costa).

Diferentes metodologias e técnicas de análise têm sido desenvolvidas e publicadas ao longo de várias décadas. De seguida apresenta-se uma breve descrição de algumas das técnicas específicas para a quantificação volumétrica e para determinar a variação da posição da linha de costa. Tradicionalmente, a análise de costas arenosas baseia-se na realização de perfis transversais à linha de costa com recurso a teodolitos e estações totais. Estas aplicações necessitam de pelo menos dois operadores, um para a estação total (ou teodolito) e outro para segurar o alvo de forma estável no ponto em que se pretende obter a coordenada. Este método, embora seja preciso (em termos da determinação das coordenadas), não é adequado para monitorizações frequentes em extensas secções de litoral devido à baixa produtividade. Outra metodologia que tem sido utilizada com sucesso em várias aplicações é o processamento de imagem aérea (digital ou analógica). As técnicas de fotogrametria exigem sobreposição de 40% a 60% para que seja possível gerar modelos de elevação do terreno que representam a superfície costeira. A fotogrametria aérea requer condições meteorológicas que nem sempre são compatíveis com levantamentos de praia pós-tempestade e isso pode ser uma desvantagem desta técnica. Contudo, para alcançar a precisão decimétrica, alcançável com esta técnica, é necessário, ter aproximadamente as coordenadas de seis pontos por foto (chamados *Ground Control Points* (GCP)). Estes pontos são normalmente determinados com recurso ao Sistema

de Posicionamento Global (GPS) em modo diferencial ou em tempo real. Trata-se de um processo por vezes moroso e dispendioso. Além disso, em superfícies arenosas não é fácil identificar bons candidatos a GCP uma vez que, estes pontos devem ser facilmente identificáveis na fotografia e devem estar bem distribuídos em cada fotografia, mas a homogeneidade da superfície arenosa dificulta esta tarefa. Uma alternativa à fotogrametria aérea é a técnica de laser aéreo de varrimento, a qual é eficaz e fornece uma precisão razoável. Contudo, necessita de um avião e de um dispendioso lazer digitalizador, o que torna esta solução pouco atrativa tendo como perspetiva os custos da operação (Batista *et al.*, 2010).

Uma abordagem diferente para a monitorização da costa através da utilização de imagens, pode ser através de camaras digitais de alta resolução fixas instaladas ao longo da faixa costeira. Através das câmaras instaladas no topo de postes altos, a informação em relação à dinâmica da costa pode ser determinada com a análise das imagens capturadas em diferentes pontos ao longo do tempo. Contudo, a precisão obtida com este método não está ao nível do centímetro, e degrada-se drasticamente com o aumento da distância à camara. Além disso, o custo e o esforço requerido para utilizar esta técnica ao longo da faixa costeira pode ser considerável uma vez que, requer infraestruturas e prevenção contra o vandalismo (Baptista *et al.*, 2010).

Em complemento ao teodolito e estação total, o GPS pode ser utilizado como uma técnica de base terrestre (em contraponto com as técnicas de base aérea – fotografia aérea e laser aéreo) muito mais produtiva na realização de perfis topográficos, os quais são diretamente georreferenciáveis em oposição aos anteriores (INPI, 2014).

O recurso ao *GPS* em modo diferencial (*Differential GPS*) ou em tempo real (*RTK* – *Real Time Kinematics GPS*) representa vantagens em relação ao teodolito e estação total pois, permite a aquisição de dados em modo cinemático contínuo, ou seja, o operador não necessita de parar para fazer o registo. A precisão destas técnicas, da ordem dos 0.03 e 0.04 m em planimetria e altimetria respetivamente, é considerada muito promissora para o posicionamento de elementos da superfície do terreno. As metodologias de monitorização que recorrem a antenas *GPS* montadas em plataformas móveis, como é o caso de veículos todo-o-terreno ou moto-quatro,

apresentam vantagens, em termos de produtividade, relativamente a metodologias de transporte a pé da antena. Este tipo de monitorização foi aplicada no presente trabalho. Foi utilizado o Sistema Integrado de Elevada Resolução Espacial, que é um sistema integrado de posicionamento que inclui três receptores GPS, um distanciómetro laser e uma unidade de sensores inerciais, montados numa estrutura metálica adaptada lateralmente numa plataforma móvel. Um dos receptores GPS permite, por processamento em modo diferencial, com uma estação de referência local, a determinação com elevada precisão das coordenadas do centro de fase da antena montada no veículo. O distanciómetro laser permite o cálculo da distância à superfície do terreno. Os vários receptores GPS permitem obter as coordenadas dos vectores entre antenas GPS, cujas distâncias são constantes, de que resulta a determinação da atitude do veículo. A unidade de sensores inerciais visa aumentar a robustez na determinação da atitude (INPI, 2014).

Capítulo III

Zona de estudo

3. Zona de estudo

Neste capítulo apresenta-se uma descrição do local onde se efetuaram as campanhas de campo, sendo referida a hidrodinâmica e transporte sedimentar que a caracteriza. São também apresentados os equipamentos utilizados, bem como a calibração dos sensores óticos, seguindo-se por fim, uma descrição dos trabalhos realizados.

3.1. Localização

Mira (Figura 3.1) é uma vila e freguesia portuguesa do concelho de Mira, com 39.82 km² de área e situa-se na costa noroeste portuguesa, à latitude de 40-42° N. Nesta povoação, a linha de costa tem aproximadamente uma orientação de 14° noroeste, sendo a praia constituída essencialmente por areia (Coelho *et al.*, 2009).



Figura 3.1 - Localização da zona de estudo (retirado do Google Earth)

3.2. Hidrodinâmica e transporte sedimentar

A região costeira da Praia de Mira é altamente energética, como pode ser deduzido a partir da média da energia das ondas obtida com os dados da análise do arquivo modelo de ondas do Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (Cruz, 2008).

Segundo Costa *et al.* (2001), na costa portuguesa, as ondas normalmente são provenientes de noroeste, com uma altura significativa da onda de 2-3 m e um período médio de onda de 8-12 s em alto mar. Tempestades geradas no oceano Atlântico norte são frequentes no inverno e podem durar 5 dias, com alturas significativas da onda até 8 m. As marés são semidiurnas, com amplitudes que variam entre 2 e 4 m durante as marés vivas. O nível médio do mar encontra-se a +2 m, referido ao Zero Hidrográfico (ZH). O regime de ondas forte induz um transporte sedimentar ao longo da costa, cuja resultante para sul é na ordem dos $1-2 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ (Oliveira, 1997).

A costa noroeste portuguesa pode ser dividida em duas partes, relativamente a características geomorfológicas. Desde Caminha até Espinho, o litoral consiste em pequenas formações rochosas e de Espinho até à Figueira da Foz contam essencialmente zonas baixas e arenosas, vulneráveis à ação das ondas e apoiadas por dunas que em alguns locais já foram destruídas. O estuário do rio Douro e a laguna de Aveiro são importantes fatores morfológicos e são fortemente influenciados por efeitos antropogénicos provenientes das cidades do Porto e Aveiro (Coelho *et al.*, 2009).

As principais fontes de sedimentos a sul do Porto são o rio Douro e as dunas. O rio Douro, no seu regime natural, costumava fornecer aproximadamente $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ por ano, mas este valor diminuiu para aproximadamente $0.25 \times 10^6 \text{ m}^3$ por ano (Oliveira, 1997), provocando um aumento da erosão costeira, uma vez que a capacidade de transporte ao longo da costa não sofreu alterações significativas. Durante as duas décadas passadas, a velocidade de recuo da costa aumentou, atingindo os 7 m por ano em algumas zonas desta região (Coelho *et al.*, 2009).

3.3. Equipamentos de medição de parâmetros hidrodinâmicos

Neste subcapítulo são apresentados e descritos os aparelhos utilizados nas campanhas de campo. Um correntómetro eletromagnético (ECM), que permitiu determinar a direção e a velocidade da corrente transversal e longitudinal, dois

transdutores de pressão (PT), que permitiram determinar a altura da coluna de água e das ondas, sendo ainda utilizados, três sensores óticos (OBS), que permitiram determinar a concentração de sedimentos em suspensão.

3.3.1. Transdutor de pressão (PT)

Um transdutor de pressão é um instrumento que converte pressão num sinal elétrico analógico. Apesar de existirem vários tipos de transdutores de pressão, um dos mais comuns é o transdutor tensométrico, representado na Figura 3.2. A conversão da pressão num sinal elétrico é ativada pela deformação física dos extensómetros que estão ligados ao diafragma do transdutor de pressão e conectados a uma ponte de configuração *wheatstone*. A pressão aplicada no transdutor de pressão produz a deformação do diafragma que introduz esforço nos medidores (Omega, 2013). Nos trabalhos de campo os sensores utilizados foram os Levell Trol com uma taxa de aquisição de dois registos por segundo.



Figura 3.2 - Transdutor de pressão Level Trol 500

Este equipamento permite determinar a altura total da coluna de água ao longo do tempo.

3.3.2. Correntómetro eletromagnético (ECM)

Um correntómetro pode registar a intensidade da velocidade e a direção da corrente, ou pode registar as componentes da corrente nas direções este-oeste e norte-sul. Os dois métodos requerem informação direcional, pelo que os correntómetros incorporam uma bússola magnética para determinar a sua orientação em relação ao norte magnético. Podem ser distinguidas quatro classes de correntómetros com base no método utilizado para medir a magnitude da corrente (OLN, 2013).



Figura 3.3 - Correntómetro eletromagnético Infinity

Nas campanhas de campo foi utilizado um correntómetro eletromagnético (ECM), que explora o facto de um condutor elétrico, ao mover-se num campo magnético, induzir uma corrente elétrica. A água do mar é um bom condutor e quando está em movimento entre dois elétrodos, a corrente elétrica induzida é proporcional à velocidade da água entre os elétrodos. Um correntómetro eletromagnético (Figura 3.3) tem uma bobine que produz um campo magnético e dois conjuntos de elétrodos fixos um ao outro em ângulo reto, que permitem determinar a velocidade a que a água passa entre os dois conjuntos. Ao combinar as duas componentes o instrumento determina a velocidade e direção da corrente (OLN, 2013). A frequência de aquisição de dados é de dez registos por segundo.

3.3.3. Sensor ótico (OBS)

O OBS (Figura 3.4) é um sensor ótico designado para detetar a dispersão e a atenuação da luz, de forma a medir os sedimentos em suspensão e a turvação em amostras de água. A qualidade da deteção depende principalmente da área de partículas iluminadas, do tamanho e forma das partículas e da reflexão. Como a área de partículas iluminada é diretamente proporcional à concentração de sedimentos em suspensão, as medições da dispersão de luz permitem estimar a quantidade de sedimentos em suspensão (Downing, 2008).

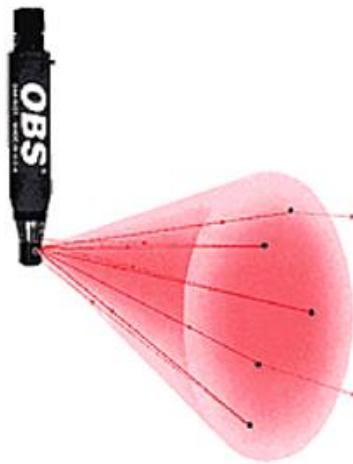


Figura 3.4 - Sensor ótico, Campbell OBS3 (Downing, 2008)

Este equipamento permite determinar as concentrações de sedimentos e tem uma frequência média de aquisição de 6.67 registos por segundo.

Para a utilização dos três OBS utilizados no trabalho de campo, procedeu-se à respetiva calibração com areia da Praia de Mira, como pode ser observado na Figura 3.5. Esta calibração foi efetuada num recipiente com cinco litros de água, onde se foi adicionando determinada quantidade de areia, sendo assim controlada a concentração de sedimentos presentes no recipiente. Para que os sedimentos estivessem sempre em suspensão foi utilizada um agitador, que manteve a concentração de sedimentos relativamente homogênea em toda a massa de água. O processo de calibração consistiu na colocação de cada OBS dentro do recipiente, registando o valor da concentração de sedimentos que se encontrava presente no

recipiente e o sinal emitido pelo instrumento. Este processo foi realizado para diversos valores de concentrações, começando com o recipiente sem sedimentos e terminando com a saturação.



a) Estrutura utilizada no processo de calibração

b) Exemplificação do processo de calibração

Figura 3.5 - Calibração dos OBS

Na Figura 3.6 podem ser observados os resultados da calibração dos OBS, sendo que o valor de concentração obtido pelo OBS foi traduzido em kg/m^3 . Refira-se que as sondas atingiram a saturação para valores entre os 3500 mV e os 4000 mV o que corresponde uma concentração de cerca de $100 \text{ kg}/\text{m}^3$.

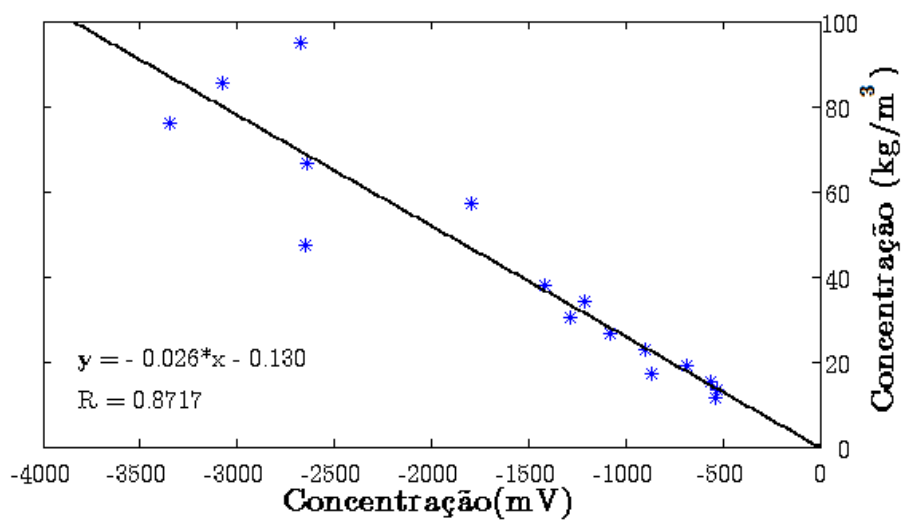
Do processo de calibração resultaram as seguintes retas de calibração:

$$C_{OBS1} = -0.026 \times OBS1 - 0.130 \quad (3.1)$$

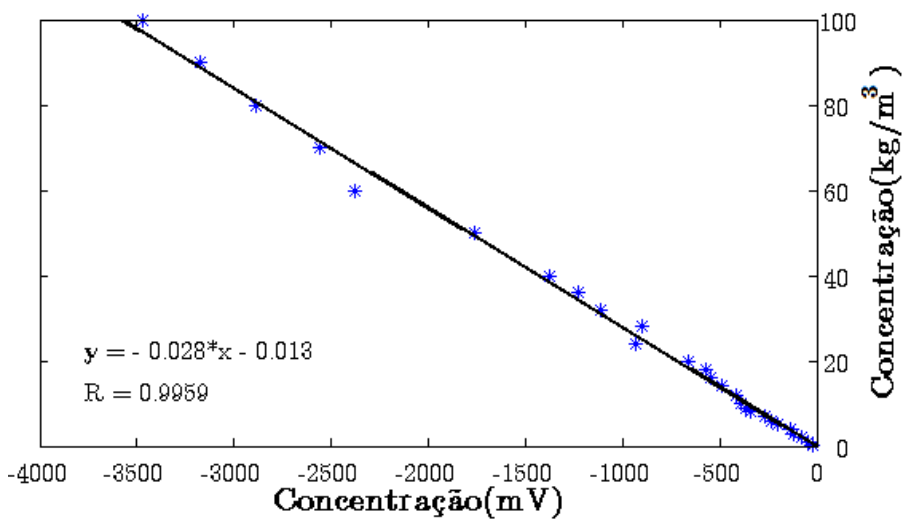
$$C_{OBS2} = -0.028 \times OBS2 - 0.013 \quad (3.2)$$

$$C_{OBS3} = -0.028 \times OBS3 - 0.110 \quad (3.3)$$

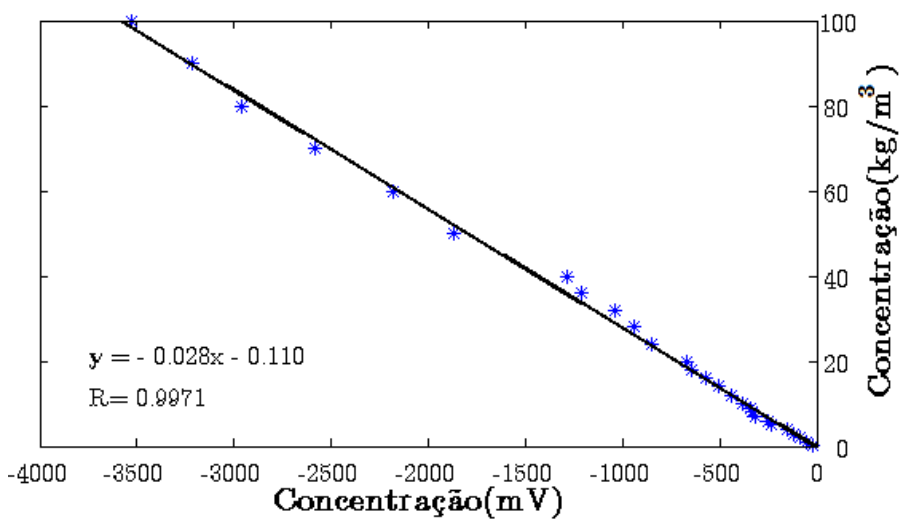
Onde C_{OBS} é o valor da concentração de sedimentos em suspensão (kg/m^3) e OBS é uma voltagem atribuída pelo aparelho a uma determina concentração.



a) OBS1



b) OBS2



c) OBS3

Figura 3.6 - Retas de calibração dos OBS

3.4. Sistema de Elevada Resolução Espacial

Para determinar as alterações morfológicas que ocorreram no sistema praial da Praia de Mira foi utilizado o sistema integrado de elevada resolução espacial, que se baseia na utilização de recetores GPS cujo sinal é integrado com um sensor de laser (Figura 3.7). Este sistema permite a determinação das coordenadas do solo dos locais analisados, com uma precisão de 1 a 2 cm (Batista *et al.*, 2011).

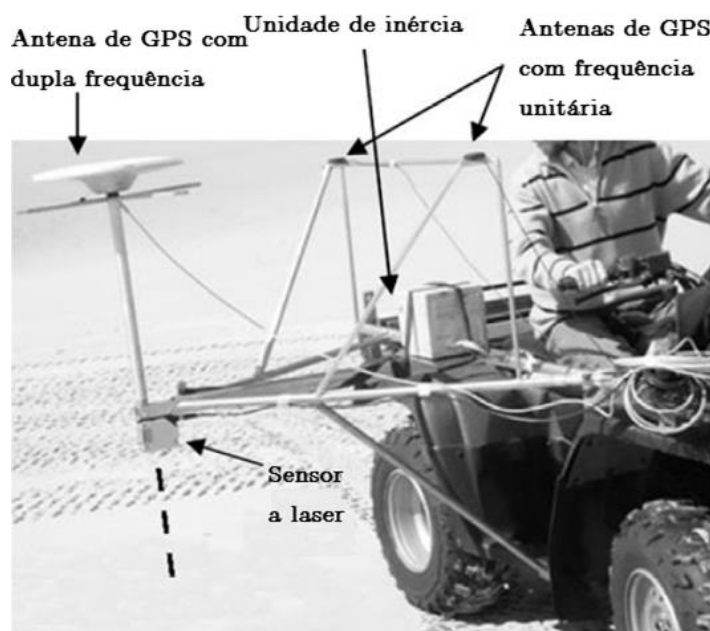


Figura 3.7 - Imagem do Sistema Integrado de Elevada Resolução Espacial, montado num quadriciclo (adaptado de Batista *et al.*, 2011)

Foram adquiridos dados por este sistema sob a forma de perfis longitudinais e transversais à linha de costa, ao longo de todo o setor em estudo, com um espaçamento médio de cerca de 80-100 metros em condições de baixa-mar de maré viva. Estes dados foram posteriormente inseridos no programa AutoCAD Civil 3D (Autodesk, 2014), o qual permitiu determinar o volume de diferença entre as superfícies da praia antes analisados.

3.5. Campanhas de campo

Ao longo do trabalho foram realizadas duas campanhas de campo. A primeira foi efetuada no dia 18 de novembro de 2013 e a segunda no dia 15 de abril de 2014. As

campanhas de campo tiveram lugar num setor localizado entre a Praia de Mira e a praia do Poço da Cruz. A calendarização foi realizada em função das previsões de maré do Instituto Hidrográfico, com vista a coincidirem com as marés vivas. Na Tabela 3.1 apresentam-se os horários das marés durante as campanhas e os níveis de superfície livre esperados (altura referente ao zero hidrográfico).

Tabela 3.1 - Previsão da maré astronómica para Aveiro (IH, 2014)

Campanhas	Data	Hora	Cota ao ZH (m)	Maré
1 ^a	2013-11-18	03:14	3.25	Preia-mar
	2013-11-18	09:04	0.74	Baixa-mar
	2013-11-18	15:32	3.16	Preia-mar
	2013-11-18	21:14	0.79	Baixa-mar
2 ^a	2014-04-15	03:40	3.38	Preia-mar
	2014-04-15	09:50	0.57	Baixa-mar
	2014-04-15	15:58	3.44	Preia-mar
	2014-04-15	22:06	0.57	Baixa-mar

Estas campanhas tiveram como principais objetivos a recolha de dados hidrodinâmicos, a aquisição de dados para avaliar a dependência da concentração de sedimentos em suspensão com os eventos de *swash* e interações *swash*-ondas, e ainda dados topográficos do perfil transversal onde foram colocados os instrumentos, bem como de todo o setor entre as praias do Poço da Cruz e de Mira.

3.5.1. Descrição das campanhas de campo

A primeira campanha teve início às 9 h com a instalação da estrutura que pode ser observada nas Figura 3.8a e 3.8b, na qual foram fixos dois OBS, um ECM e um PT. A estrutura foi instalada em período de baixa-mar, para que ao longo do ciclo de maré se registassem características de concentração de sedimentos em suspensão, velocidades de corrente e alturas da coluna de água. Na estofa de preia-mar pretendia-se obter registos das ondas antes de ocorrer a rebentação. Enquanto decorriam os trabalhos de instalação de todos os equipamentos, foi realizado o levantamento topográfico da zona de estudo (praia emersa) com o sistema anteriormente descrito (Figura 3.8c). Aos 0 m da linha de água, aos 25 m e aos

50 m em situações de baixa-mar, foram recolhidos sedimentos para a caracterização granulométrica da praia.

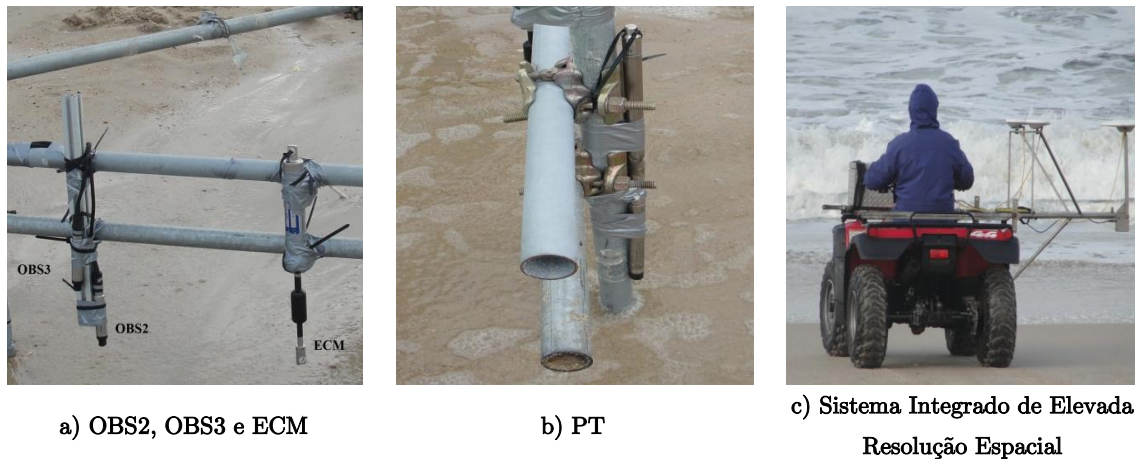


Figura 3.8 - Instalação de equipamentos e registo topográfico da praia

Como pode ser observado na Figura 3.9a, foram colocadas seis varas distanciadas de 10 m para auxiliar as medições do espraçamento (*runup*) e para medir a variação do nível da superfície da areia. Na superfície da areia foram colocadas anilhas para determinar a espessura da camada ativa dos sedimentos. As varas começaram a ser colocadas junto da estrutura e terminaram na base da duna. Segundo Battjes (1974), o *runup* é a elevação máxima da linha de água acima do nível de água sem perturbações. A disposição em campo da estrutura e das varas pode ser observada na Figura 3.9.

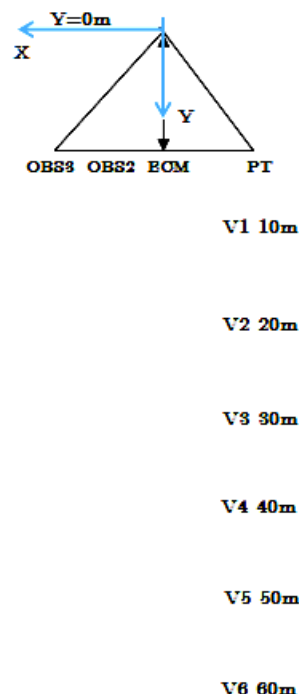
Nesta campanha a praia apresentava uma face de praia com um ligeiro pendente de comprimento aproximado de 10 m, uma zona plana que se iniciava no topo da berma e que se estendia cerca de 25 m até uma zona com pendente acentuada que comunica com a base da duna. No local do transepto a praia não apresentava estruturas morfológicas longitudinais. Constatou-se ainda que, a partir das 11 h se levantou um vento intenso proveniente de norte que se manteve constante ao longo do dia.

A segunda campanha de campo teve início por volta das 10 h, onde foram realizados os mesmos procedimentos, sendo de referir que se procedeu apenas à montagem de

uma estrutura idêntica à estrutura da campanha anterior e nesta foi instalado mais um sensor OBS.



a) Disposição do equipamento na primeira campanha



b) Esquema da distribuição do equipamento

Figura 3.9 - Posicionamento dos instrumentos da primeira campanha de campo

3.5.2. Altura de influência de cada OBS na coluna de água

Pretendeu-se definir a altura de influência da coluna de água que cada OBS representa (Figura 3.10). Na primeira campanha o OBS2 foi colocado inicialmente a 10 cm do solo e o OBS3 foi colocado a 24 cm do solo. Assim foi definida uma hipótese onde, os registos do OBS2 representam o caudal sólido em suspensão na coluna de água entre o solo e os 17 cm de altura. As concentrações registadas pelo OBS3 representam o caudal sólido em suspensão na coluna de água entre os 17 cm de altura e a altura máxima da coluna de água ao longo do tempo. Ao fim do dia o OBS2 encontrava-se a 20 cm de distância do solo o que indica, que a cota do solo foi variando ao longo do tempo. Assumiu-se que esta variação temporal foi linear, representada através de uma equação que tem como ordenadas inicial e final os 10 cm e os 20 cm respetivamente.

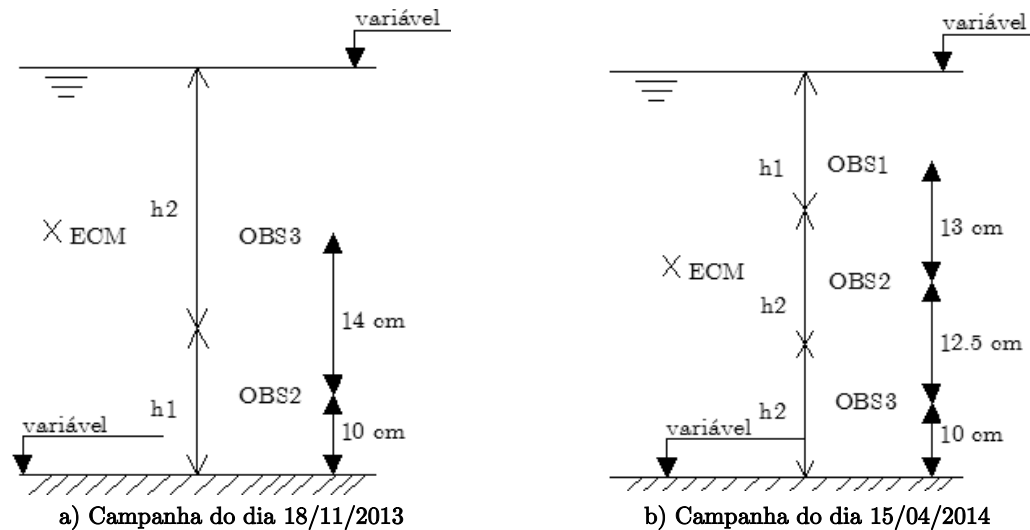


Figura 3.10 - Posição inicial dos equipamentos na coluna de água

Na segunda campanha o OBS3 foi colocado inicialmente a 10 cm do solo, o OBS2 foi colocado a 22.5 cm do solo e o OBS1 foi colocado a 35.5 cm do solo. Assim foi definida a hipótese em que os registos do OBS3 representam o caudal sólido em suspensão na coluna de água entre o solo e os 16.5 cm de altura, o OBS2 representa o caudal sólido entre os 16.5 cm e os 29 cm de altura e o OBS1 representa o caudal sólido entre os 29 cm de altura e a altura máxima da coluna de água ao longo do tempo. Ao fim do dia o OBS3 encontrava-se a 2 cm de distância do solo, pelo que a variação temporal foi representada através de uma equação que tem como ordenadas inicial e final os 10 cm e os 2 cm respetivamente.

Capítulo IV

Análise de resultados

4. Análise de resultados

Neste capítulo foram tratados todos os dados registados pelos equipamentos durante as duas campanhas de campo. Primeiramente foi realizada a análise dos dados do transdutor de pressão, seguindo-se o ECM e o OBS. Em cada um dos subcapítulos foram analisados em simultâneo os dados obtidos em cada campanha.

4.1. Altura total da coluna de água

Neste subcapítulo são apresentados e analisados todos os dados registados pelo PT, sendo realizada uma comparação entre os registos obtidos nas duas campanhas. São também avaliados os dados de maré previstos pelo Instituto Hidrográfico, e os registos de ondulação obtidos ao largo pela boia de Leixões nos dias das campanhas de campo, que permitiram avaliar níveis de superfície livre de água e as alturas de onda ao longo do tempo.

4.1.1. Registos

Na Figura 4.1 são apresentados os valores da altura total da coluna de água do mar (h) registados pelo transdutor de pressão (PT), entre as 10 h e as 20 h do dia 18/11/2013, na primeira campanha de campo e, entre as 11 h e as 21 h do dia 15/04/2014, na segunda campanha de campo.

A altura total da coluna de água representa a distância desde o nível da superfície livre da água até ao fundo de areia, já considerando a variação da cota de fundo ao longo do tempo, pela aproximação linear referida no terceiro capítulo.

Como pode ser observado na Figura 4.1a o PT entre as 10 h e as 12 h da primeira campanha encontrava-se na zona de espraio, atingiu uma altura máxima de cerca de 2.5 m entre as 14 h e as 16 h e, voltou novamente a entrar na zona de espraio depois das 18 h (alturas próximas de zero). Já na Figura 4.1b pode ser observado que na segunda campanha o PT se encontrava na zona de espraio aproximadamente entre as 11 h e as 13 h, e a coluna de água atinge a altura máxima superior a 2.5 m por

volta das 16 h, voltando a entrar na zona de espraio cerca das 19 h. Constata-se assim que, o comportamento registado em ambas as campanhas de campo foi similar, com valores de alturas totais da coluna de água muito semelhantes. Na Figura 4.1 também é possível observar que as condições marítimas estiveram mais calmas na segunda campanha, uma vez que, a amplitude das variações entre a altura máxima e mínima registadas ao longo do tempo são inferiores às observadas na primeira campanha de campo. A avaliação do período de tempo em que os dispositivos se encontram na zona de espraio é importante para determinar o caudal sólido, uma vez que, só se considerou os intervalos de tempo em que os equipamentos procediam a registos correspondentes à zona de rebentação e empolamento. No caso da primeira campanha, o intervalo corresponde à zona de rebentação pertencente ao período entre as 12 h e as 18 h, e na segunda campanha corresponde ao período entre as 12:40 h e as 19:40 h.

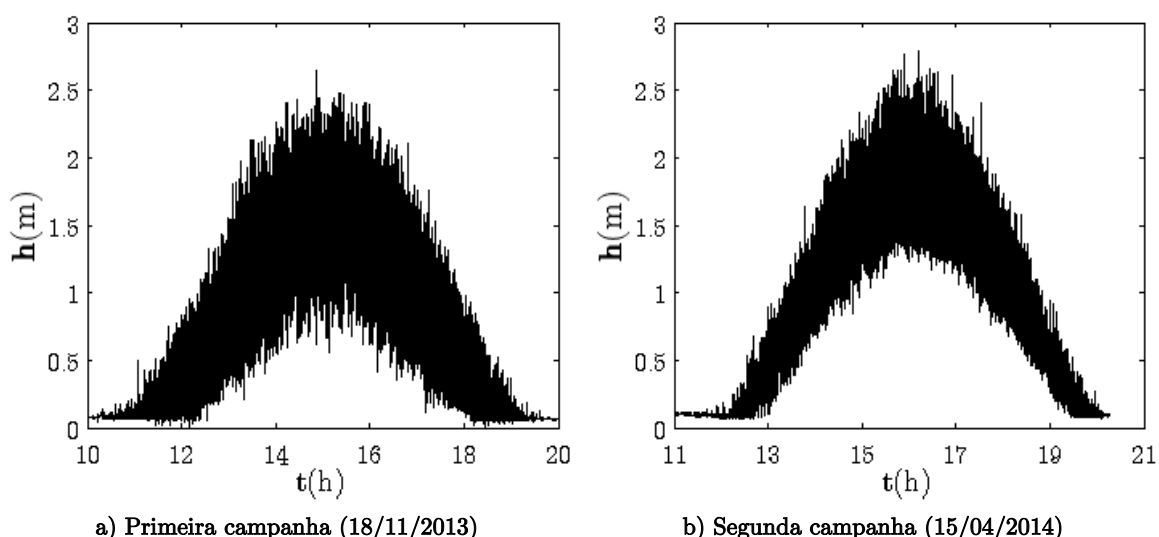


Figura 4.1 - Altura total da coluna de água ao longo do tempo da campanha

Os registos do PT de ambas as campanhas foram filtrados com uma frequência de corte de 0.05 Hz, separando assim a componente associada à maré, da componente relacionada com ondulação e agitação marítima. Posteriormente, calcularam-se as médias a cada dez minutos dos resultados obtidos para a altura da coluna de água e da altura significativa da onda (média do terço mais elevado das alturas de onda que foram registadas durante o período de observação), que podem ser visualizados na Figura 4.2. O valor máximo da altura significativa da onda foi de

aproximadamente 1.2 m na primeira campanha de campo e, cerca de 1 m na segunda. A coluna de água atingiu cerca de 1.5 m de altura em preia-mar na primeira campanha e, aproximadamente 1.7 m na segunda campanha de campo o que corrobora o facto da amplitude ser superior na segunda campanha.

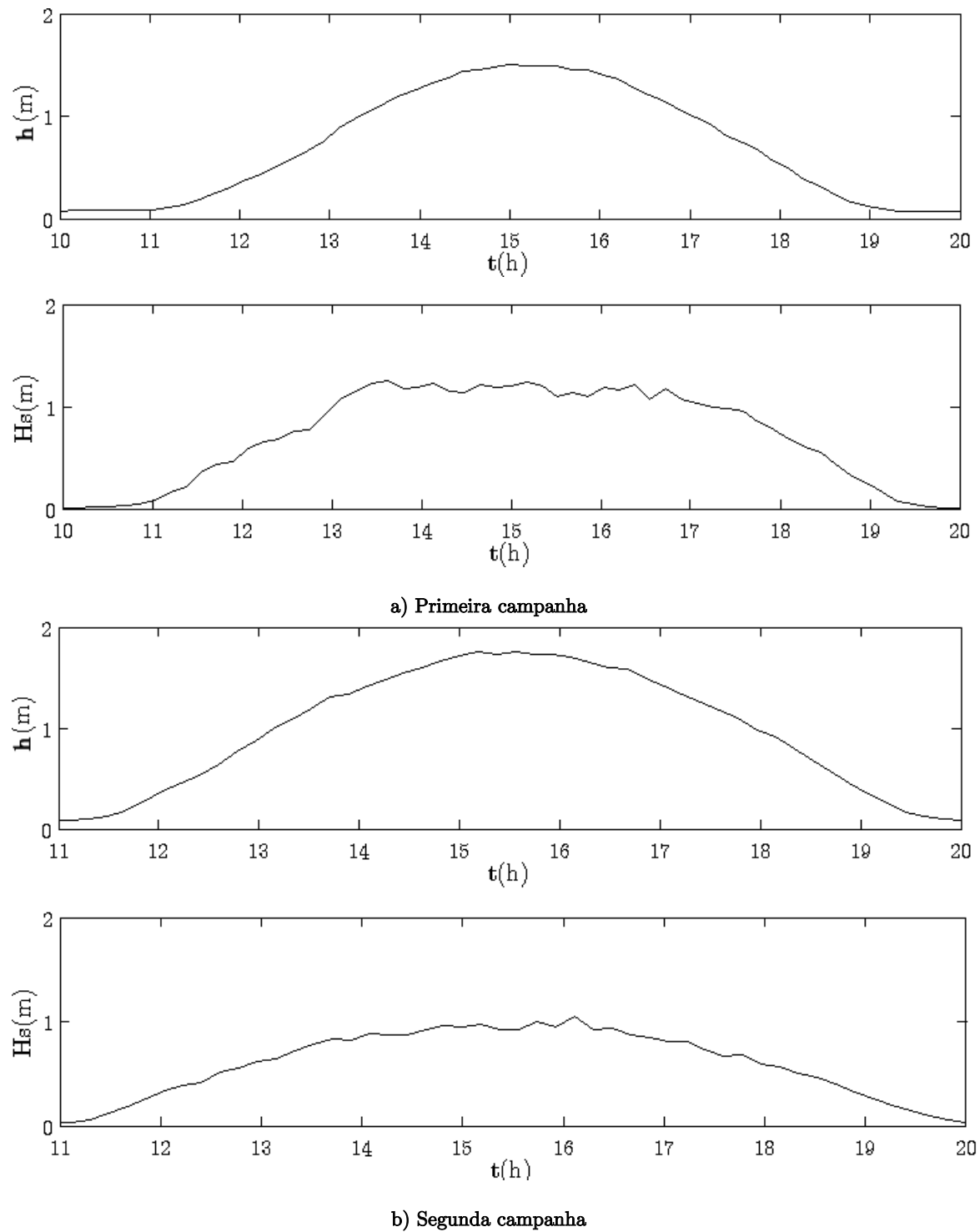


Figura 4.2 - Altura da coluna de água (h) e altura significativa da onda (H_s) ao longo do tempo

A análise da Figura 4.2, mostra que o dispositivo na primeira campanha esteve na zona de rebentação entre as 12 h e as 14 h e voltou a entrar nesta zona entre as 17 h e as 18 h, estando na zona de empolamento entre as 14 h e as 17 h, período a que corresponde a uma altura de onda praticamente constante no tempo. Os resultados obtidos na segunda campanha de campo não permitem definir estes intervalos com tanta facilidade, já que não há um patamar tão definido na altura da onda ao longo do tempo em condições próximas da preia-mar.

4.1.2. Marés

As previsões de maré retiradas da página de internet do Instituto Hidrográfico (IH, 2014), para ambas as campanhas, podem ser observadas na Tabela 3.1. Os dados presentes nesta tabela vêm confirmar as medições efetuadas no PT durante as campanhas de campo. Para a primeira campanha o IH previu que na zona de Aveiro, a superfície livre da água atingisse a preia-mar por volta das 15 h, e os dados obtidos em campo estão muito próximos dos previstos. Já no que se refere à segunda campanha, os dados obtidos foram coincidentes com a previsão realizada pelo IH para a hora a que a coluna de água iria atingir a altura máxima (cerca das 16 h).

4.1.3. Altura, período e direção da ondulação

Os registos de alturas de onda da boia de Leixões, ilustradas na Figura 4.3, indicam que os valores atingidos pela altura significativa da onda variaram entre 1 m e 1.5 m em ambas as campanhas de campo com o valor médio de 1.3 na primeira campanha e 1.2 na segunda campanha. A altura máxima atingida (máxima altura de onda registada durante o período de observação), teve valores que variaram entre os 1.5 m e os 3 m na primeira campanha e valores que alternaram entre 1.5 m e os 2.5 m na segunda campanha. Estes valores concordam com a tendência observada nos resultados obtidos pelo PT na Figura 4.2a e 4.2b, já que após a propagação, considerando o efeito da refração e empolamento, se registaram ondas com alturas de cerca de 1.2 m na campanha do dia 18/11/2013 e ondas com altura de cerca de 1 m na campanha do dia 15/04/2014.

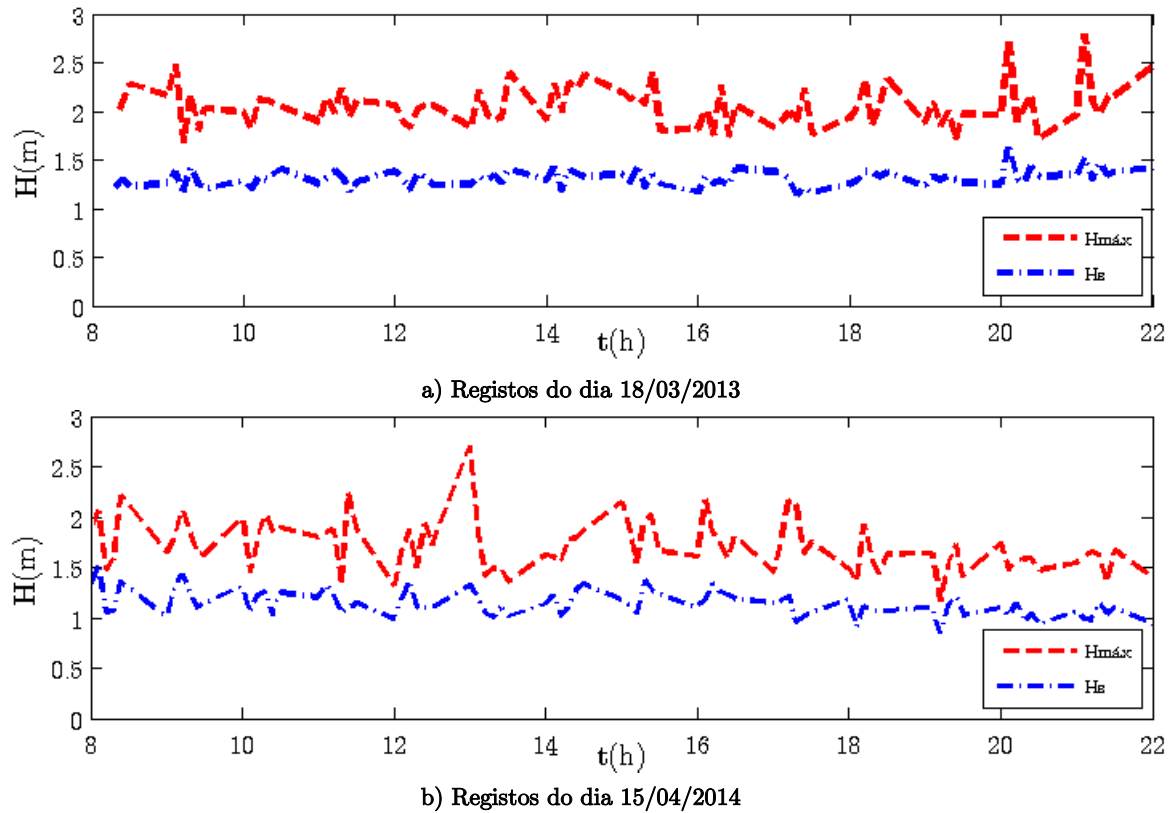


Figura 4.3 - Altura significativa da onda e altura máxima registadas pela boia do ondógrafo de Leixões (IH, 2014)

Na Figura 4.4 podem ser observados os registos da boia de Leixões para o período médio das ondas (T_z) e para o período de pico das ondas (T_p) sendo que, o período médio das ondas representa o período típico das ondas registadas durante o período de observação e, o período de pico das ondas corresponde à banda de frequência com o máximo valor de densidade espectral. Como se pode observar, na primeira campanha de campo, os períodos de pico variaram entre os 6 s e os 7 s e os períodos médios entre os 5 s e os 6 s. Na segunda campanha de campo pode-se visualizar que os períodos de pico variaram entre os 7 s e os 13 s e os períodos médios variaram entre os 6 s e os 11 s.

Como pode ser visualizado na Figura 4.5, a direção da ondulação nos dias das campanhas de campo teve origem nos quadrantes, noroeste (representado a azul), no quadrante oés-noroeste (representado a vermelho) e no quadrante nor-noroeste (representado a preto).

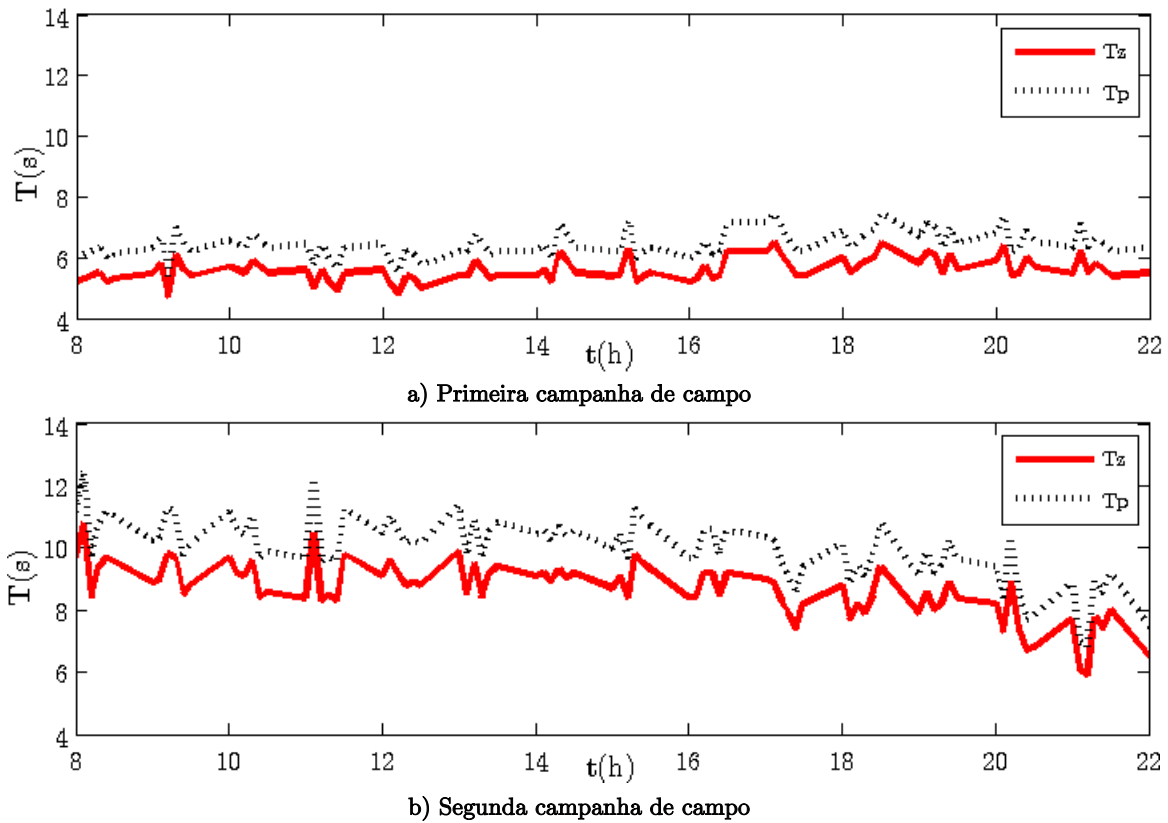


Figura 4.4 - Período de pico das ondas (T_p) e período médio das ondas (T_z) registadas pela boia do ondógrafo de Leixões (IH, 2014)

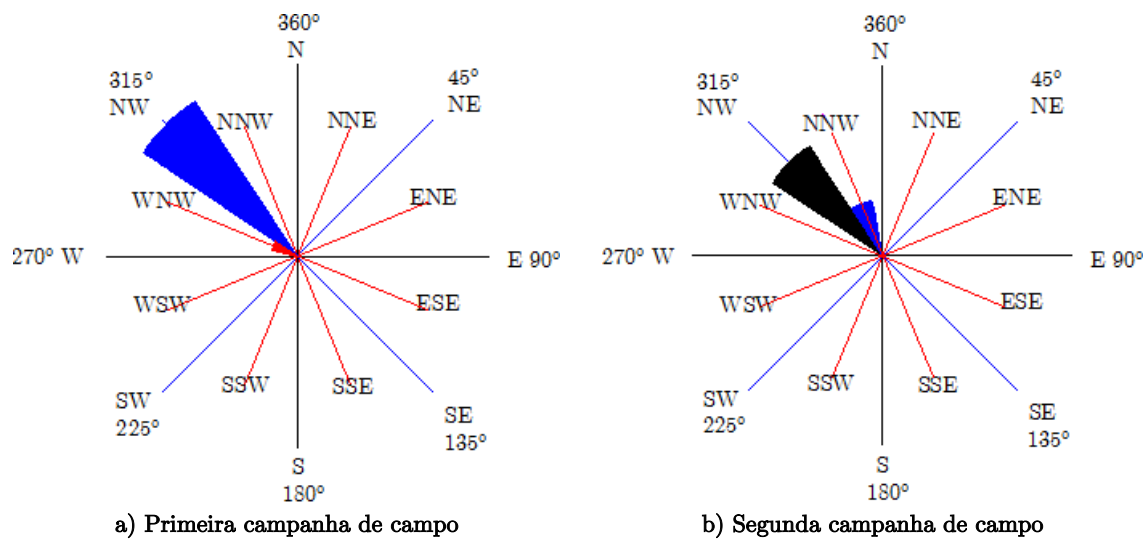


Figura 4.5 - Direção da ondulação registada pela boia do ondógrafo de Leixões (IH, 2014)

Considerando que as campanhas de campo decorreram entre as 8 h e as 22 h, através dos dados registados pela boia de leixões pode-se constatar que no decorrer da primeira campanha de campo 96% da ondulação teve origem no quadrante noroeste,

tendo os restantes 4% origem no quadrante oés-noroeste, note-se ainda que estes 4% foram registados logo no início da campanha de campo. Durante a segunda campanha de campo em 70% dos registos a ondulação teve origem a noroeste e, nos restantes 30% a nor-noroeste.

4.1.4. Profundidade de rebentação

Foi estimada através da Equação 2.1 a profundidade a partir da qual as ondas iniciam o processo de rebentação. Assim, considerando que a altura máxima da onda significativa foi de 1.2 m na primeira campanha de campo e de 1 m na segunda, a onda entraria em processo de rebentação para valores inferiores a cerca de 1.5 m e 1.3 m de profundidade, respetivamente.

Na primeira campanha de campo estimou-se que, o PT esteve na zona de empolamento entre as 14 h e as 17 h. Foram selecionados os dados de H_b e h_b nesses períodos de tempo e, posteriormente foi determinada a média de H_b/h_b obtendo-se o valor 0.85. Apesar da segunda campanha não ter um registo definido que permita determinar se o PT esteve ou não na zona de empolamento, optou-se por considerar os dados de H_b e h_b entre as 14 h e as 17 h de forma a determinar o valor de H_b/h_b , para o qual se obteve a relação de 0.57.

4.2. Velocidades da corrente

No presente subcapítulo são apresentados e analisados todos os dados recolhidos pelo ECM durante as duas campanhas de campo, nomeadamente as componentes de velocidade transversal e longitudinal à praia e a direção das ondas incidentes, sendo ainda referidos todos os cuidados que foram necessários ter em conta durante a análise dos dados obtidos.

A colocação do ECM no campo tem em consideração a orientação para que se possam avaliar a componente transversal e longitudinal das velocidades em relação à praia. A orientação do ECM foi verificada com uma bússola (Figura 4.6). O ângulo entre o sensor de temperatura do ECM (eixo interno do ECM OY) e o norte foi medido com auxílio de um fio, para o qual se obteve o valor 120° no caso da primeira

campanha e 85° na segunda campanha. Estes ângulos foram submetidos à correção com a perpendicular, com a diferença entre o norte magnético e o geográfico e, com a orientação da linha de costa portuguesa, da qual resultaram os ângulos 13° e 22° para a primeira e segunda campanha respetivamente. Posteriormente estes ângulos permitiram realizar uma correção aos valores de v_x e v_y , através de uma transformação de coordenadas sendo de seguida calibrada a velocidade através da Equação 4.1:

$$V_{xy} = (1 + \beta \frac{4v_x^2 v_y^2}{v_x^2 v_y^2}) \times \sqrt{v_x^2 v_y^2} \quad (4.1)$$

onde, β é uma constante de calibração do ECM que toma o valor de 0.1. Através dos valores de v_x e v_y foi possível determinar o ângulo θ_{xy} utilizando a equação 4.2:

$$\theta_{xy} = \frac{(\tan^{-1}(V_x/V_y) + \delta) \times 180}{\pi} \quad (4.2)$$

onde, $\delta=0$ para $v_y \geq 0$, $\delta=\pi$ para $v_y < 0$, sendo θ_{xy} o ângulo entre o eixo y (na direção perpendicular à linha de costa) e a componente V_{xy} . De seguida as componentes v_{x1} e v_{y1} foram calculadas através das equações 4.3 e 4.4.

$$v_{x1} = V_{xy} \sin \theta_{xy} \quad (4.3)$$

$$v_{y1} = V_{xy} \cos \theta_{xy} \quad (4.4)$$

Após a calibração das velocidades ficaram definidos como positivos os sentidos representados na Figura 3.1c, onde pode ser observado que o sentido positivo no caso da corrente longitudinal tem a direção norte-sul e que o sentido positivo da corrente transversal ocorre na direção da costa.

Na Figura 4.7 encontram-se representadas a cor azul as velocidades registadas pelo ECM. Encontra-se representado a cor vermelha o sinal dos registos com frequência

acima da frequência de corte (índice H nas figuras), que correspondem essencialmente às velocidades orbitais. A cor verde está representado o sinal com frequência inferior à frequência de corte (índice L nas figuras) que é mais relevante na determinação da velocidade da corrente longitudinal.



Figura 4.6 - Bússola para medição do ângulo entre o sensor de temperatura do ECM e o norte

Através da observação dos registos a verde, da Figura 4.7a e da Figura 4.7c pode-se constatar que a componente da velocidade na direção longitudinal apresenta valores entre -1 m/s e 1 m/s e têm menores amplitudes do que as velocidades transversais. Na Figura 4.7b e na Figura 4.7d é visível o efeito do movimento orbital das ondas, com registos a oscilar entre os -2 m/s e os 2 m/s. Observa-se que as velocidades longitudinal e transversal na segunda campanha têm valores de menor dimensão ao longo do tempo, quando comparados com a primeira campanha de campo.

Os resultados originais foram sujeitos ao filtro acima descrito, permitindo assim determinar os valores médios de v_x e v_y e a direção da onda a cada intervalo de dez minutos, entre as 12 h e as 18 h para a primeira campanha, (Figura 4.8a) e entre as 12:40 h e as 19:40 h para a segunda campanha (Figura 4.8c).

O intervalo de valores das 12 h às 13 h e das 17 h às 18 h no caso da primeira campanha, e das 12:40 h às 13:40 h e das 18:40 h às 19:40 h no caso da segunda campanha é desprezado uma vez que estes estão sob a influência da zona de rebentação, na Figura 4.8 pode-se observar que o ângulo de incidência da onda na

primeira campanha apresenta uma orientação entre o eixo y e V_{xy} que varia entre os -5° e os -40° e na segunda campanha um ângulo que varia entre os 20° e os -40° . A variação da direção do ângulo nos resultados da segunda campanha de campo foi confirmada visualmente durante a própria campanha, já que por vezes se observaram ondas orientadas para norte e por vezes para sul.

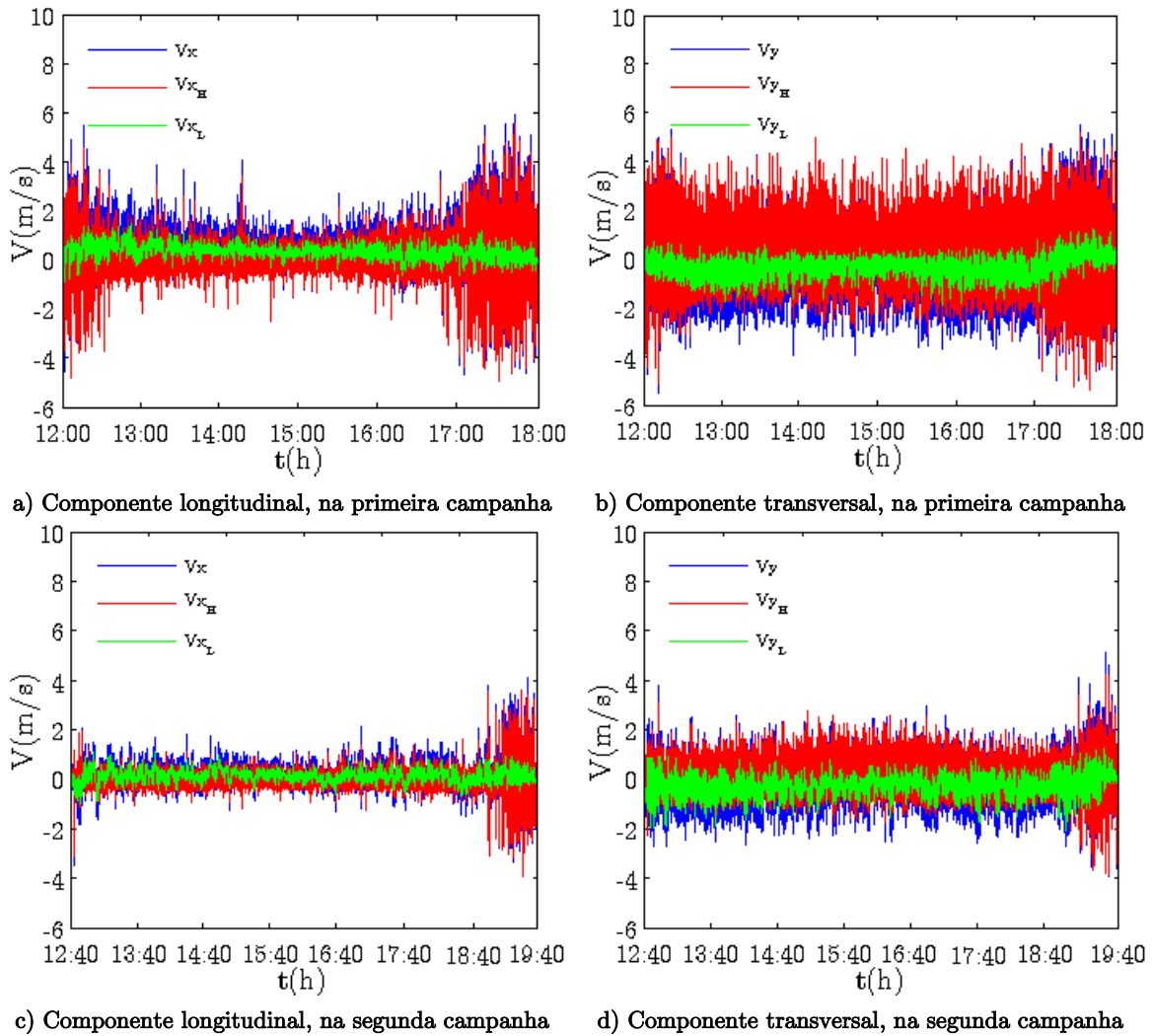


Figura 4.7 - Velocidades da corrente registadas durante as campanhas

No que diz respeito à velocidade longitudinal, a média dos intervalos de dez minutos revela que esta varia entre os 0.2 m/s e os 0.7 m/s na primeira campanha, o que indica uma clara predominância do sentido norte-sul. Na segunda campanha de campo os valores oscilam entre os -0.2 m/s e os 0.4 m/s. No entanto, pode ser constatado que existem mais registos com velocidades positivas o que

poderá indicar predominância do sentido norte-sul, com impacto no sentido de transporte sedimentar também para sul, em ambas as campanhas.

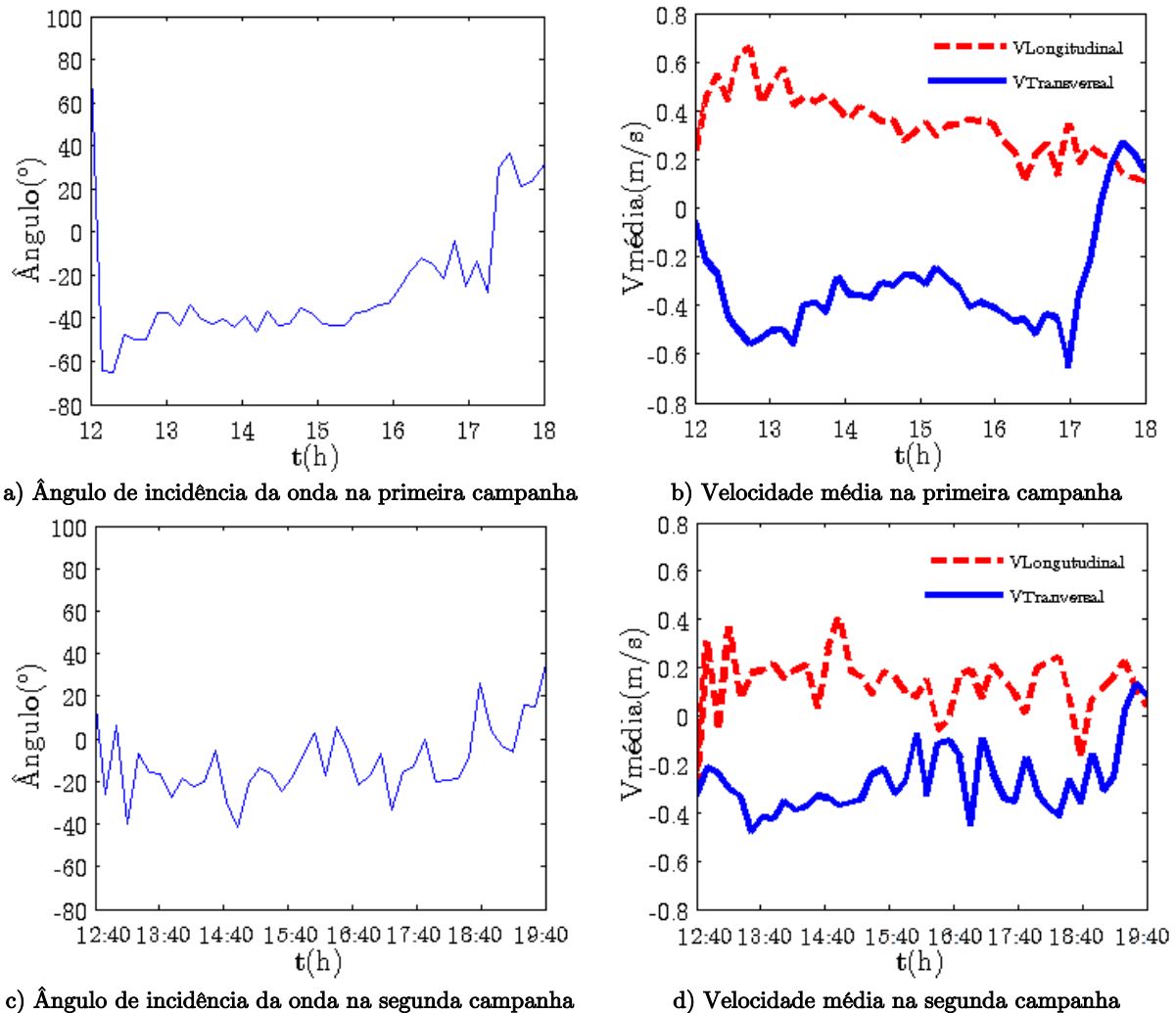


Figura 4.8 - Média do ângulo de incidência da onda e das velocidades a cada intervalo de dez minutos

No que se refere à velocidade transversal da corrente, ambas as campanhas de campo apresentam valores de velocidade negativos, sendo que na primeira campanha (Figura 4.8b) os valores variam entre -0.6 m/s e os -0.2 m/s, e na segunda campanha (Figura 4.8d) variam entre 0 m/s e -0.4 m/s.

4.3. Concentração de sedimentos em suspensão

Neste subcapítulo são apresentados e interpretados os registos dos OBS, para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão. Na primeira campanha

foram utilizados dois OBS no tripé, conforme descrito anteriormente e, na segunda campanha foram utilizados três OBS no tripé. Foi utilizado mais um OBS na segunda campanha com o intuito de se avaliar e melhorar a distribuição das concentrações de sedimentos em cotas superiores da coluna de água. Inicialmente são apresentados os registos em bruto sendo posteriormente apresentados os valores já ajustados à calibração realizada. Por fim, procedeu-se à comparação entre os registos de cada OBS juntamente com a evolução da altura da coluna de água ao longo do tempo.

Na Figura 4.9a apresenta-se o sinal captado pelos OBS2 (azul escuro) e OBS3 (preto), entre as 12 h e as 18 h do dia 18/11/2013, e na Figura 4.9b encontram-se representados os registos do OBS1 (azul claro), OBS2 e OBS3, na campanha do dia 15/04/2014. Mais uma vez é possível distinguir o período em que os dispositivos estiveram sujeitos à zona de empolamento e à zona de rebentação, uma vez que, como foi referido no segundo capítulo, é expectável que exista uma maior quantidade de sedimentos em suspensão na zona de rebentação, do que na zona de empolamento.

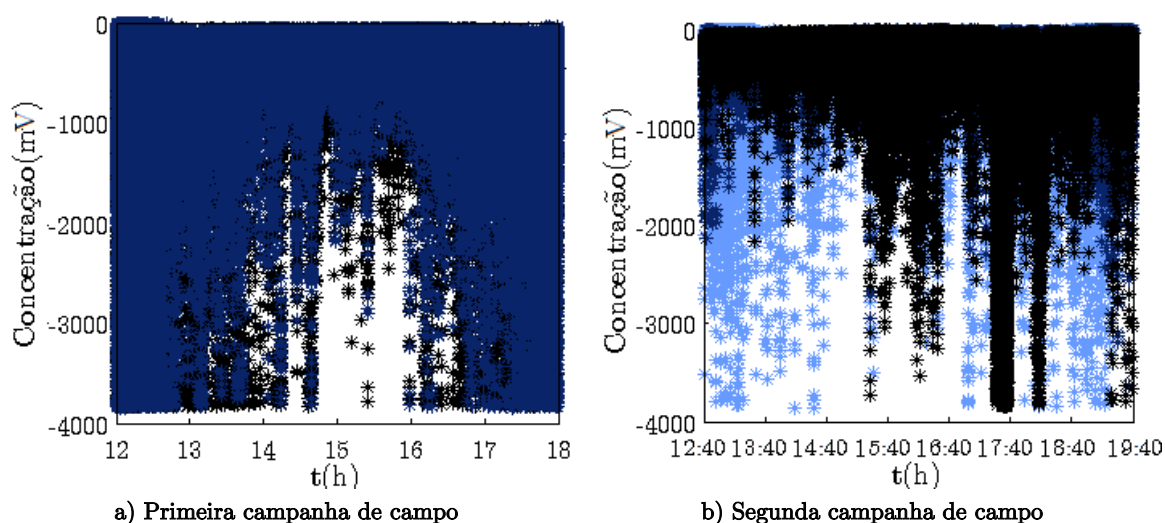


Figura 4.9 - Valores de concentração dos sedimentos em suspensão. O OBS1 encontra-se representado a azul claro, o OBS2 a azul escuro e o OBS3 a preto

Na Figura 4.9a, como os dois OBS estão distanciados 10 cm na vertical da coluna de água, pode ser observado, que na zona de rebentação a distribuição de sedimentos é relativamente uniforme e na zona de empolamento a maior concentração, como é esperado, encontra-se mais junto ao fundo. No caso da Figura 4.9b não é possível

determinar tão claramente quando o dispositivo se encontra na zona de rebentação e na empolamento.

Os resultados registados foram sujeitos à reta da calibração de cada OBS ($C_{OBS1} = -0.026 \times OBS1 - 0.130$; $C_{OBS2} = -0.028 \times OBS1 - 0.013$ e $C_{OBS3} = -0.028 \times OBS1 - 0.110$), por forma a obter concentrações de sedimentos em suspensão expressas em kg/m^3 . A Figura 4.10 revela que, durante a campanha do dia 18/11/2013 foi registada uma maior concentração de sedimentos em suspensão do que na campanha do dia 15/04/2014. Esta observação verifica-se essencialmente quando se comparam os períodos em que os OBS se encontram na zona de rebentação. No caso da primeira campanha, tanto o OBS2 como o OBS3, nos períodos das 12 h às 13 h e no das 17 h às 18 h apresentam predominantemente concentrações de aproximadamente $100 kg/m^3$, enquanto que no caso da segunda campanha de campo, apenas o OBS1 e mais subtilmente o OBS2, apresentam resultados que permitem determinar quando estes se encontram na zona de rebentação, uma vez que apresentam valores mais baixos de concentrações de sedimentos em suspensão entre as 14 h e as 18 h. As concentrações apresentadas pelo OBS1 na zona de rebentação são em média $30 kg/m^3$.

Na segunda campanha de campo as concentrações do OBS2 apresentam um registo médio praticamente constante de aproximadamente $20 kg/m^3$. Como o OBS3 era o dispositivo que se encontrava mais perto do solo, seriam de esperar valores de concentração de sedimentos em suspensão mais elevados na zona de rebentação e, que estes valores diminuíssem ao longo do tempo voltando a aumentar quando estivessem novamente na zona de rebentação, mas como se pode observar na Figura 4.10e isto não acontece. O OBS3 apresenta valores de concentração que permanecem praticamente constantes entre as 12:40 h e as 15 h tornando-se posteriormente mais irregulares. Nos intervalos das 15 h às 16 h e das 17 h às 18 h existe um claro aumento da concentração de sedimentos. Pela observação dos dados antes de serem calibrados, pode-se constatar que a origem mais provável para o aumento repentino destas concentrações poderá ter sido devido a uma das fitas, que prendiam o material de medição, ter obstruído o olho ótico do OBS.

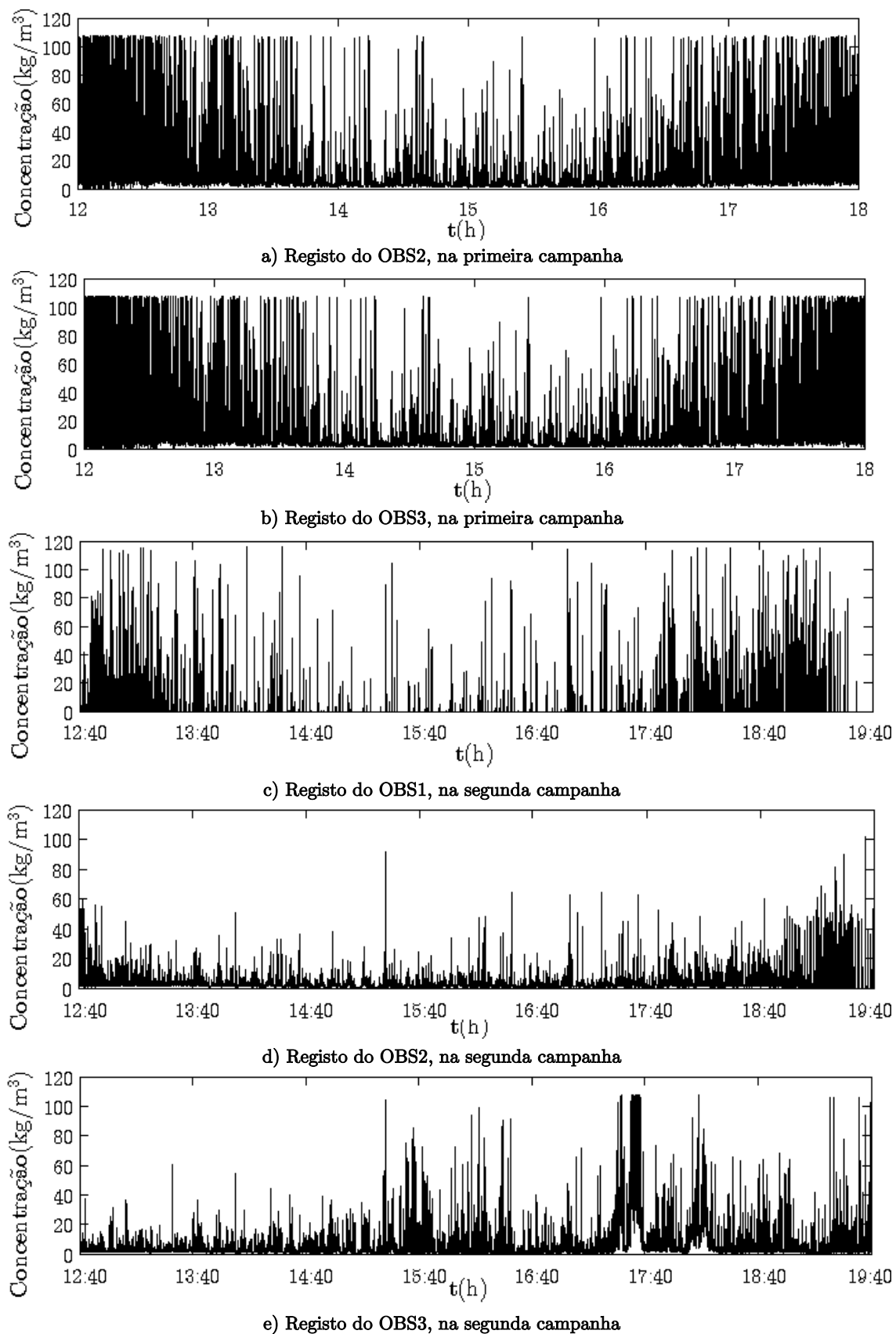
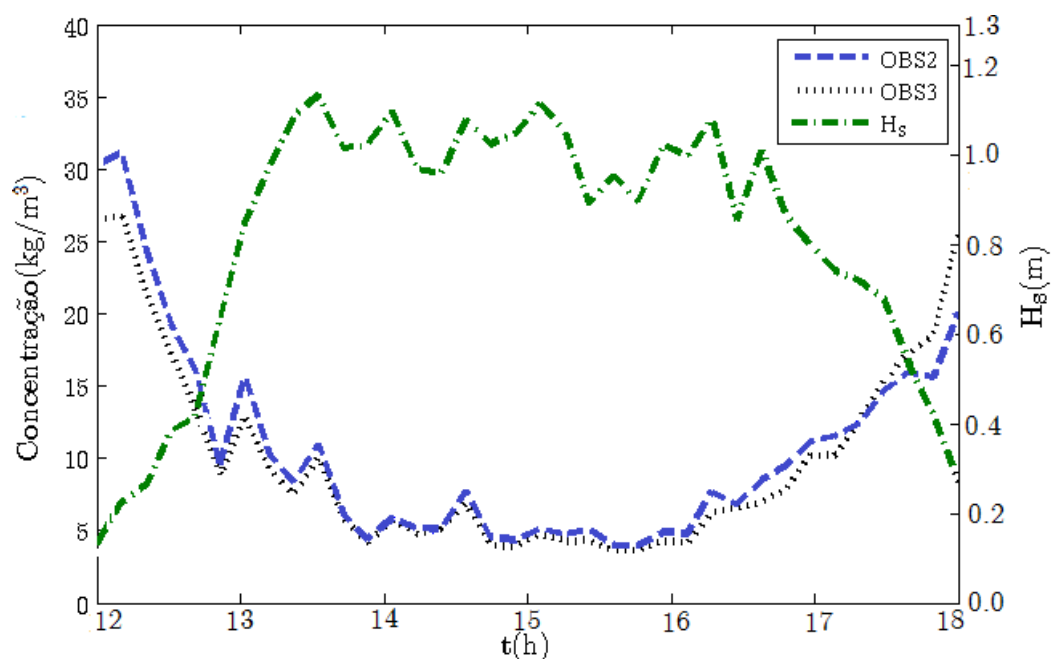
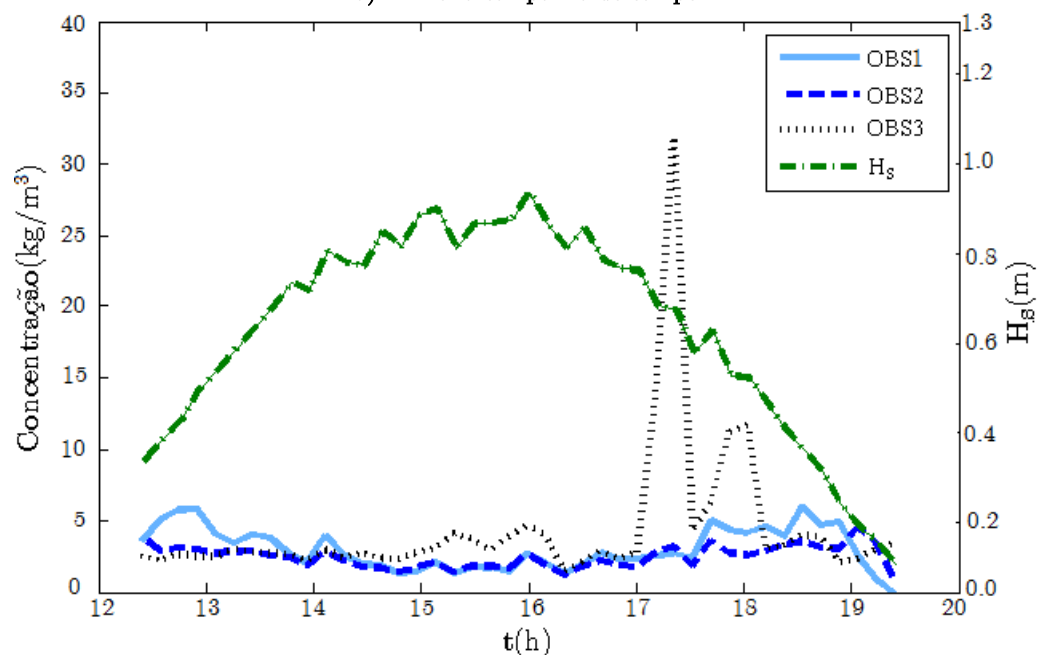


Figura 4.10 - Concentração de sedimentos em suspensão ao longo das campanhas

Na Figura 4.11 são apresentadas médias de dez minutos dos registos da altura significativa da onda medidos no PT e da concentração de sedimentos em suspensão, ao longo do tempo. Estes gráficos permitem visualizar que à medida que os equipamentos vão saindo da zona de rebentação e entrando na zona de empolamento, a concentração de sedimentos em suspensão diminui.



a) Primeira campanha de campo



b) Segunda campanha de campo

Figura 4.11 - Médias de dez minutos da altura significativa de onda versus concentração de sedimentos

Este facto é mais evidente na primeira campanha (Figura 4.11a), pois no caso da Figura 4.11b o registo das concentrações permaneceu relativamente constante ao longo do tempo. Como já foi referido o pico de concentração registado pelo OBS3, entre as 17 h e as 18 h, provavelmente não teve origem numa elevação súbita dos níveis de sedimentos em suspensão mas, poderá ter sido causado por algum objeto que tenha obstruído a leitura do aparelho. Esta suposição também se confirma pelo simples facto dos níveis de concentração de sedimentos em suspensão no OBS1 e no OBS2 não terem acompanhado este aumento.

Capítulo V

Caudal sólido em suspensão

5. Caudal sólido em suspensão

Neste capítulo são apresentados os resultados da estimativa do caudal sólido em suspensão, que conjuga a aplicação das medições realizadas pelos diferentes aparelhos no campo e o caudal sólido em suspensão obtido através das formulações de CERC e de Kamphuis. Por fim, é realizada uma comparação entre os diversos resultados.

5.1. Análise do caudal sólido em suspensão medido nas campanhas

Conhecendo as velocidades de corrente e a quantidade de sedimentos em suspensão, foi possível determinar o caudal sólido em suspensão. Apresenta-se inicialmente o resultado do produto entre a concentração de sedimentos registado pelos OBS em cada instante e a velocidade longitudinal e transversal, sendo estes dados posteriormente multiplicados pela altura da coluna de água associada à influência e posição de cada aparelho.

Como já foi referido no terceiro capítulo, os instrumentos utilizados na determinação do caudal sólido em suspensão têm diferentes frequências de registo. Assim, primeiramente os registos do OBS e do PT foram submetidos a uma função de interpolação, de forma a ficarem com o mesmo número de dados que o ECM, durante o período de tempo em análise, que no caso da primeira campanha corresponde ao período entre as 12 h e as 18 h e no caso da segunda campanha corresponde ao período entre as 12:40 h e as 19:40 h.

5.1.1. Caudais instantâneos

Na Figura 5.1 pode ser observado o resultado do produto em cada instante, da velocidade longitudinal e transversal, pela concentração de sedimentos em suspensão registados pelo OBS2 e OBS3 durante a primeira campanha de campo.

Analisando os valores do produto entre a concentração de sedimentos em suspensão e as velocidades, identifica-se tanto nos registos longitudinais, como nos transversais a zona de rebentação (com maiores caudais sólidos) e a zona de empolamento (período com menor capacidade de transporte). Comparando a Figura 5.1a e 5.1c, pode-se observar que, existe um transporte significativo de sedimentos em suspensão

na direção longitudinal. Ambos os OBS registam o valor $300 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ quando se encontram na zona de rebentação, embora o OBS2 revele transporte predominante na direção norte-sul (valores positivos) enquanto que, o OBS3 revela transporte em ambos os sentidos. No que diz respeito à direção transversal, observa-se que o transporte oscila em ambos os sentidos (Figura 5.1b e 5.1d), ocorrendo predominantemente transporte na direção oeste-este (valores positivos).

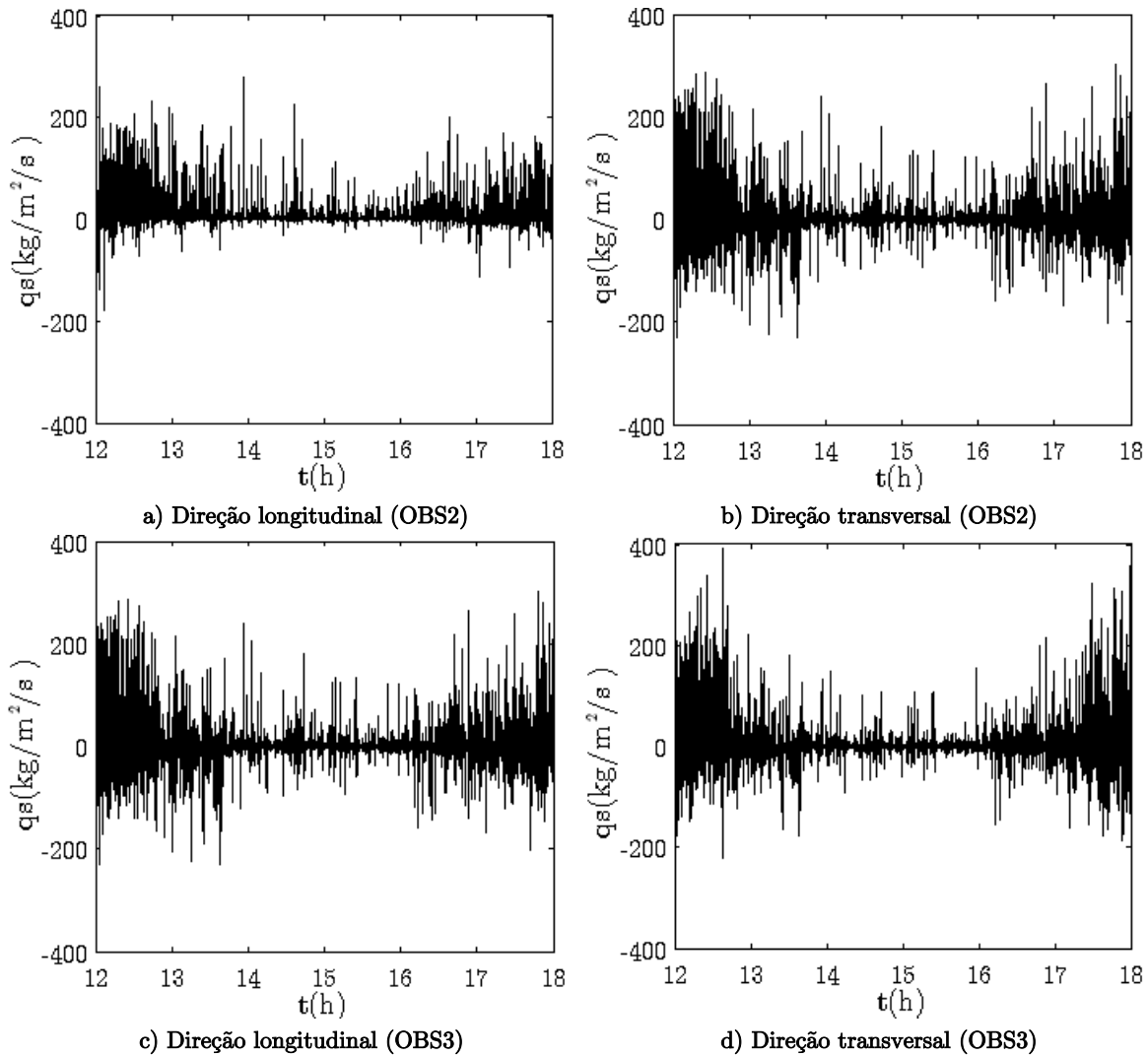


Figura 5.1 - Caudal sólido instantâneo em suspensão, na primeira campanha

Os resultados obtidos na campanha do dia 15/04/2014 podem ser observados na Figura 5.2 e pode-se constatar que o resultado do produto em cada instante, das concentrações de sedimentos em suspensão pela velocidade longitudinal e transversal na segunda campanha é muito inferior ao da primeira campanha.

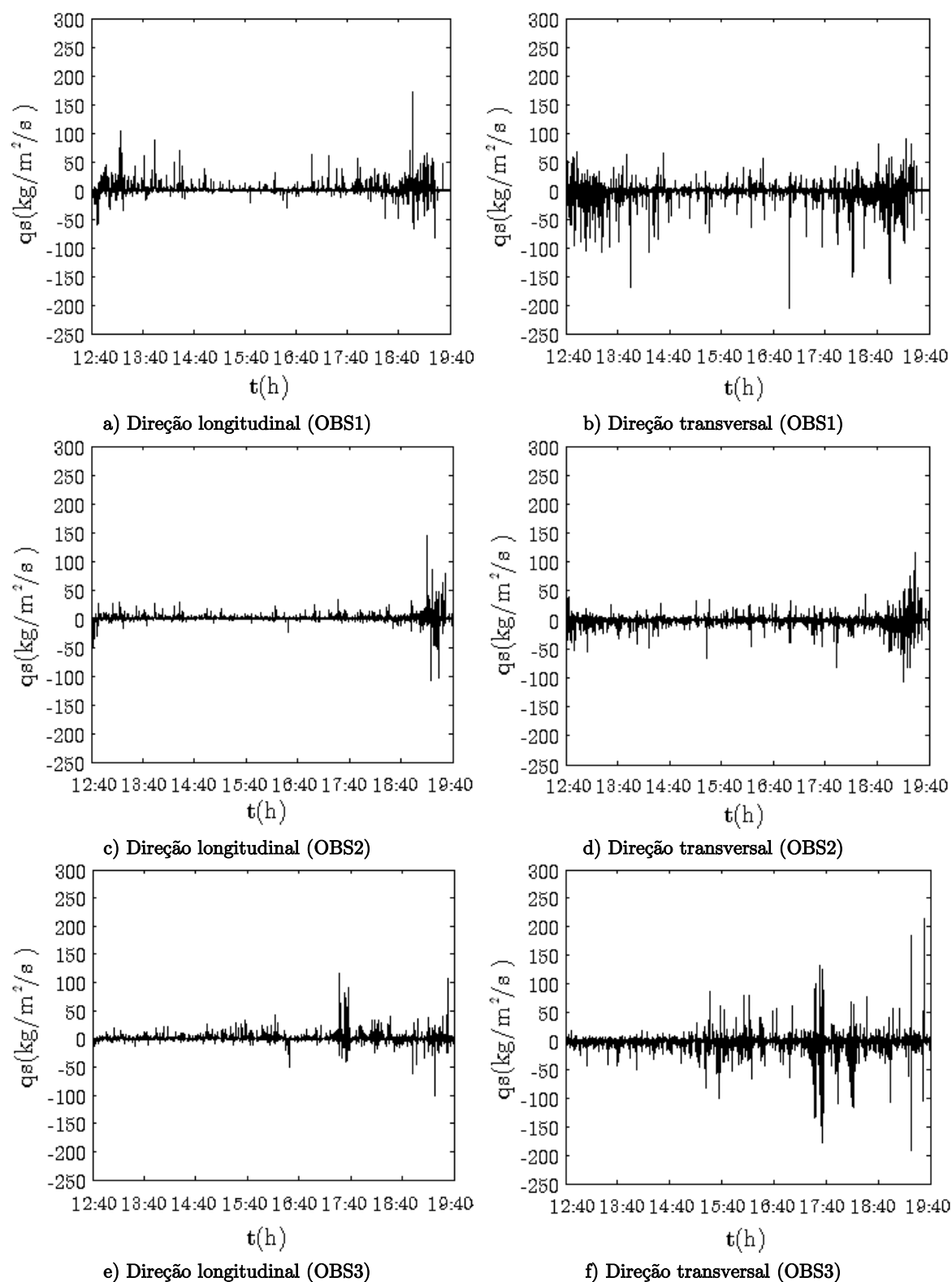


Figura 5.2 - Caudal sólido instantâneo em suspensão, na segunda campanha

Fazendo uma comparação dos registos do produto entre a concentração de sedimentos em suspensão e a velocidade longitudinal presentes vê-se que o registo

da Figura 5.2a é o único que apresenta resultados mais significativos, obtendo em média valores de cerca de $30 \text{ kg/m}^2/\text{s}$. No entanto, apesar de ser reduzido, todos os instrumentos revelam predominância de transporte longitudinal no sentido norte-sul (valores positivos). No que diz respeito ao transporte transversal, todos revelam uma tendência de transporte no sentido negativo, ou seja, na direção este-oeste, o que poderá indicar que a praia tenha sofrido erosão durante o ciclo de maré monitorizado no dia 15/04/2014.

Nas Figura 5.3 e Figura 5.4 representa-se a média a cada dez minutos do caudal sólido instantâneo em função da variação da altura total da coluna de água, na direção longitudinal e transversal. Esta análise foi realizada com o intuito de observar a dependência do caudal sólido transportado com a altura da coluna de água.

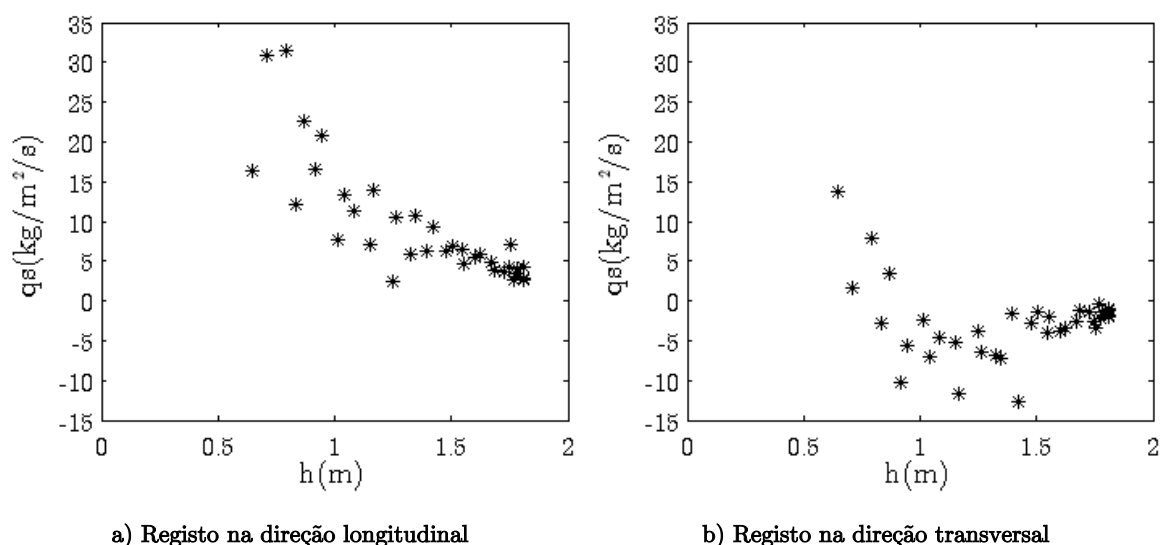


Figura 5.3 - Média a cada dez minutos do caudal sólido em função da altura da coluna de água na primeira campanha

Observa-se uma diminuição do caudal sólido longitudinal em suspensão com o aumento da altura da coluna de água. No que diz respeito ao transporte transversal, também se verifica esta diminuição à medida que a altura da coluna de água aumenta, mas pode ser observado que entre 1.3 m e 2 m de altura existe uma ligeira diminuição em valor absoluto dos sedimentos em transporte. Com esta análise

comprova-se que neste ciclo de maré o caudal sólido em suspensão diminuiu com o aumento da altura da coluna de água.

Os resultados apresentados na Figura 5.4 relativos à segunda campanha são diferentes dos observados na Figura 5.3, uma vez que o produto entre a concentração registada pelos OBS e as velocidades longitudinal e transversal apresentam registos praticamente constantes, não exibindo uma variação pronunciada da concentração com o aumento da altura da coluna de água.

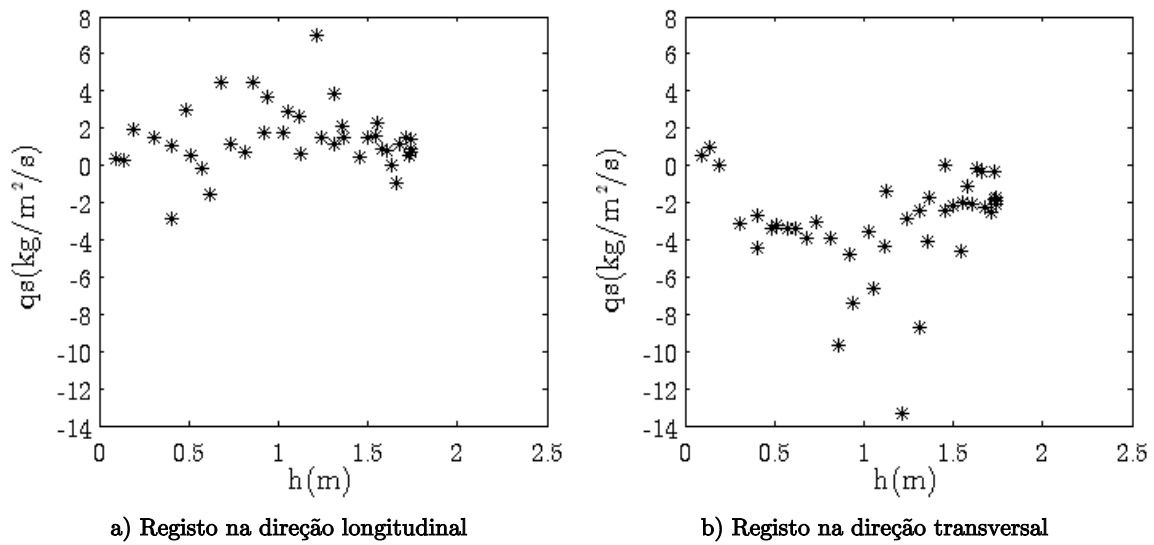


Figura 5.4 - Média do caudal sólido em função da altura da coluna de água a cada dez minutos na segunda campanha

5.1.2. Caudais instantâneos em função da altura de influência dos OBS

Antes de proceder ao cálculo do caudal sólido associado a toda a coluna de água, foi necessário determinar a altura da coluna de água que cada OBS deveria representar. Como foi descrito no terceiro capítulo, considerou-se que o OBS colocado na posição mais elevada iria representar a influência de toda a parte superior da coluna de água até à altura máxima atingida pelo ciclo de maré. Após uma breve análise, verificou-se que este OBS iria representar 60% do caudal sólido total, tanto para a primeira campanha, como para a segunda, porque considera uma altura muito maior da coluna de água do que os outros OBS. No entanto, sabe-se que a concentração de sedimentos em suspensão junto ao fundo deve ser maior (ver Figura 2.4). Para

avaliar de forma mais detalhada como é que a altura representada pelo OBS na posição mais elevada, influenciava o cálculo do caudal sólido em suspensão, optou-se por realizar uma análise onde se faria variar a altura de influência do OBS colocado na posição mais elevada. Foram então considerados três cenários, o primeiro considera uma altura de influência até à altura máxima atingida pela coluna de água, o segundo considera uma altura de influência de 20 cm (valor próximo das alturas de influência representadas pelos restantes OBS) e o terceiro cenário não considera a influência do OBS superior (0 cm).

Nas Figura 5.5 e 5.6 apresenta-se o caudal em suspensão na direção longitudinal e transversal para a primeira e segunda campanha, respetivamente, de acordo com as alturas de influência consideradas para cada OBS. Nestas figuras Q_{s1} representa os registos de caudal sólido em suspensão, considerando que a altura de influência do OBS superior atinge a altura máxima da coluna de água e, Q_{s2} representa os valores de caudal sólido em suspensão, considerando que o OBS superior tem uma altura de influência de 20 cm. Cada componente de caudal foi determinada através do produto entre a componente da velocidade, a concentração de sedimentos em suspensão registada pelo OBS e a respetiva altura de influência da coluna de água, em cada instante de tempo.

As Figura 5.5a e Figura 5.5c confirmam, mais uma vez, que o transporte ocorre na direção norte-sul, com uma média de valor de transporte de 40 kg/m/s no caso do OBS2 (Figura 5.5a) e de 60 kg/m/s no caso do OBS3, para os registos de Q_{s1} (Figura 5.5c). Considerando apenas com o registo de Q_{s1} , é mais perceptível o avançar do ciclo de maré na Figura 5.5a do que na Figura 5.5c, uma vez que altura de influência do OBS3 é muito maior que a do OBS2, e este facto comprova-se observando o registo Q_{s2} .

No que se refere ao transporte transversal de sedimentos, nas Figura 5.5b aparentemente o transporte ocorre maioritariamente no sentido positivo, com valores médios de 30 kg/m/s. Na Figura 5.5d, analisando apenas Q_{s1} , não é perceptível se o transporte ocorre no sentido positivo ou negativo e os picos de concentração são muito mais instáveis, variando por isso entre os 50 kg/m/s e os 100 kg/m/s em

ambos os sentidos. Observando Q_{s2} torna-se perceptível que o transporte sólido em suspensão na direção transversal ocorre maioritariamente no sentido da praia.

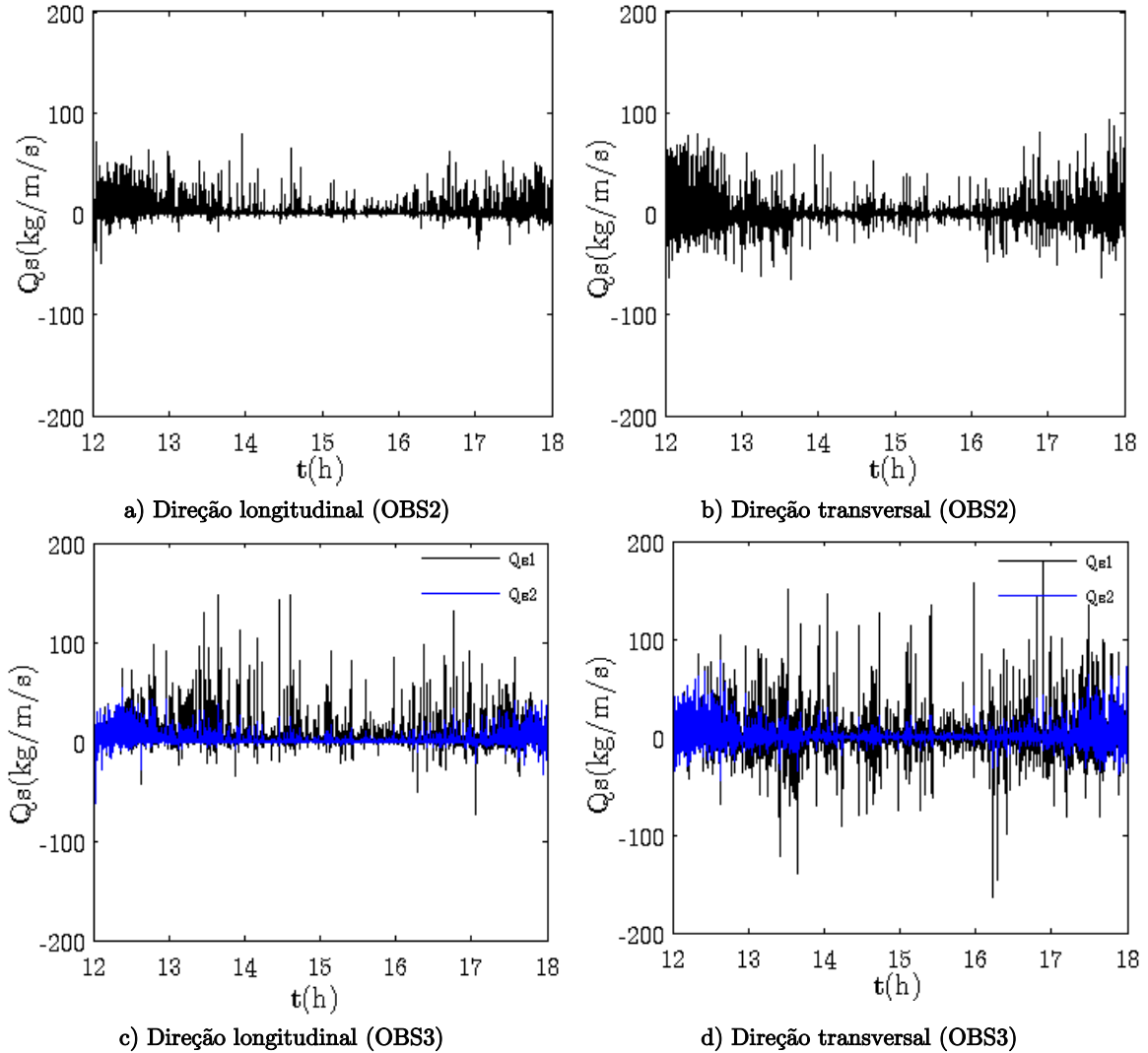


Figura 5.5 - Caudais instantâneos em função da altura de influência de cada OBS (primeira campanha)

Analisando os caudais instantâneos em função da altura de influência de cada OBS da segunda campanha de campo presentes na Figura 5.6, observa-se que a maior parte do caudal sólido em suspensão é transportado na altura representada pelo OBS1. Este facto verifica-se nos registos de Q_{s1} , uma vez que a altura de influência é bem maior que a dos restantes OBS e, confirma-se nos registos de Q_{s2} , ou seja, segundo estes dados, nesta segunda campanha de campo existe a possibilidade de ter passado naquela altura da coluna de água 60% do caudal sólido em suspensão. O facto dos registos apresentados na Figura 5.6a e 5.6b atingirem valores de caudal mais elevados, contribui positivamente para que os resultados da concentração

registada pelo OBS3 entre as 17 h e as 18 h, não terem um grande erro associado no resultado final do caudal sólido transportado.

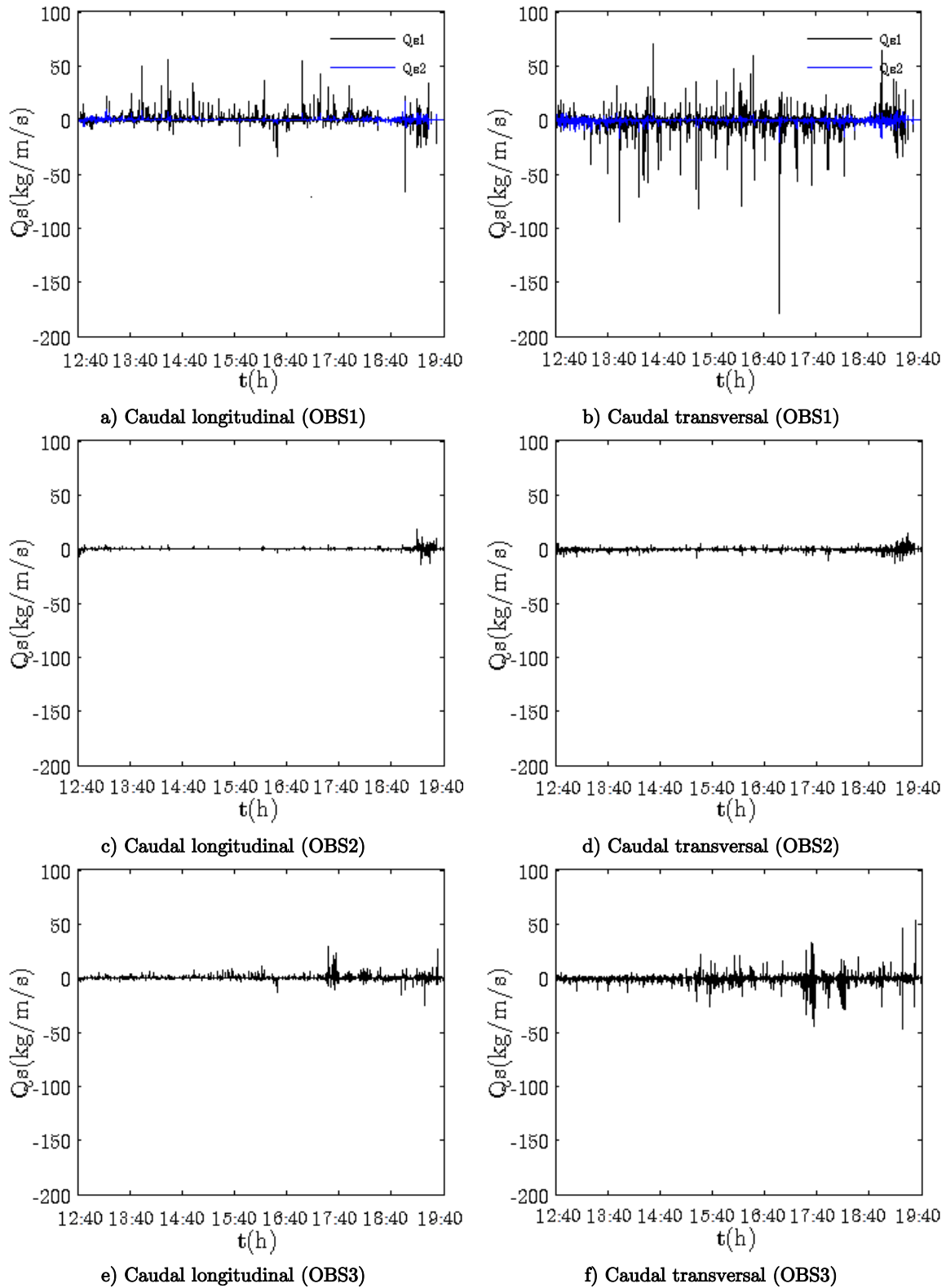


Figura 5.6 - Caudais instantâneos em função da altura de influência de cada OBS (segunda campanha)

Comparando os registos de Q_{s1} e Q_{s2} da primeira e segunda campanha de campo, percebe-se que a maior diferença entre estes dois registos ocorre a meio do ciclo de maré, quando a altura da coluna de água é maior.

5.1.3. Caudais instantâneos integrados em toda a coluna de água

Na Figura 5.7 podem ser observados os valores totais do caudal longitudinal e transversal calculados no ciclo de maré da primeira campanha de campo. Quando os aparelhos se encontravam na zona de rebentação os valores de caudal na direção longitudinal rondaram os 50 kg/m/s e na zona de empolamento 20 kg/m/s (Figura 5.7a). Na Figura 5.7b observa-se que o caudal total transversal também atingiu valores de 50 kg/m/s na zona de rebentação que, no caso de Q_{s1} se mantiveram mais ou menos constantes ao longo do ciclo de maré, diminuindo ligeiramente na zona de empolamento. Os registos de Q_{s1} e Q_{s2} são quase coincidentes na zona de rebentação e na zona de empolamento distanciam-se ligeiramente. Os valores de Q_{s2} e Q_{s3} (considera-se que a altura de influência do OBS localizado na zona superior tem o valor de 0 cm) quase que se sobrepõem na zona de empolamento, ou seja, a quantidade de caudal a passar neste local é muito reduzida. Nesta figura é possível visualizar que a maior discrepância entre os valores de Q_{s1} , Q_{s2} e Q_{s3} são registados das 13 h às 14 h e das 16 h às 17 h, ou seja, entre a zona de rebentação e de empolamento, o que poderá indicar que esta é a zona onde o cálculo do caudal sólido é mais afetado.

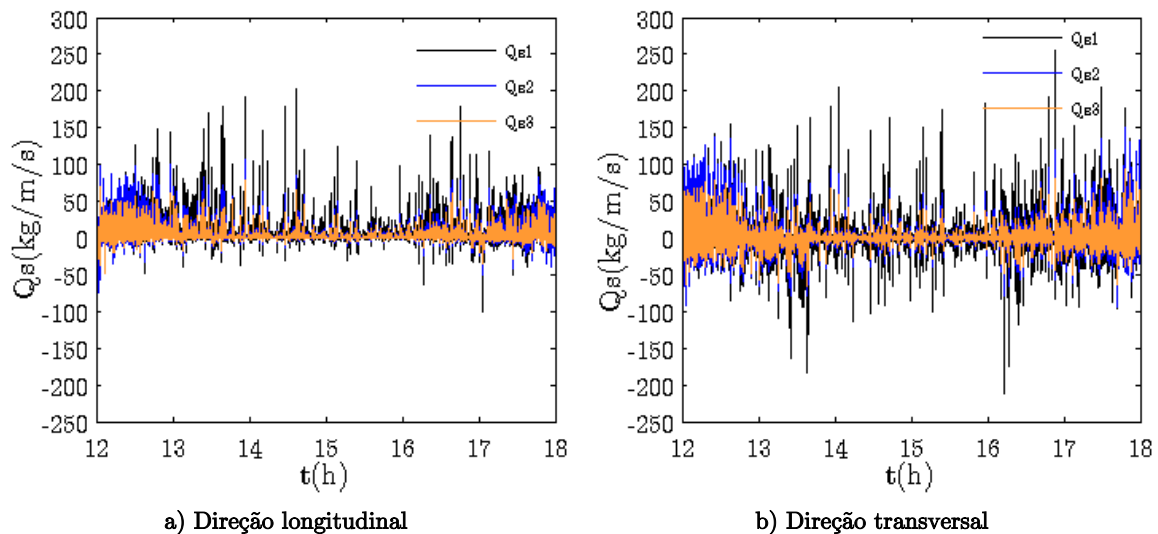


Figura 5.7 - Caudais totais, no ciclo de maré da primeira campanha

O caudal longitudinal total da segunda campanha de campo (Figura 5.8) permaneceu relativamente contante ao longo do tempo com um transporte aproximado de 10 kg/m/s, não sendo assim possível observar um pico de transporte na zona de rebentação. O caudal transversal, também se manteve constante ao longo do ciclo de maré, salvo alguns picos de concentração positivos e negativos. Nesta figura também se observa que os valores de Q_{s1} , Q_{s2} e Q_{s3} são praticamente iguais, verificando-se uma ligeira discrepância entre os valores de Q_{s1} e Q_{s3} .

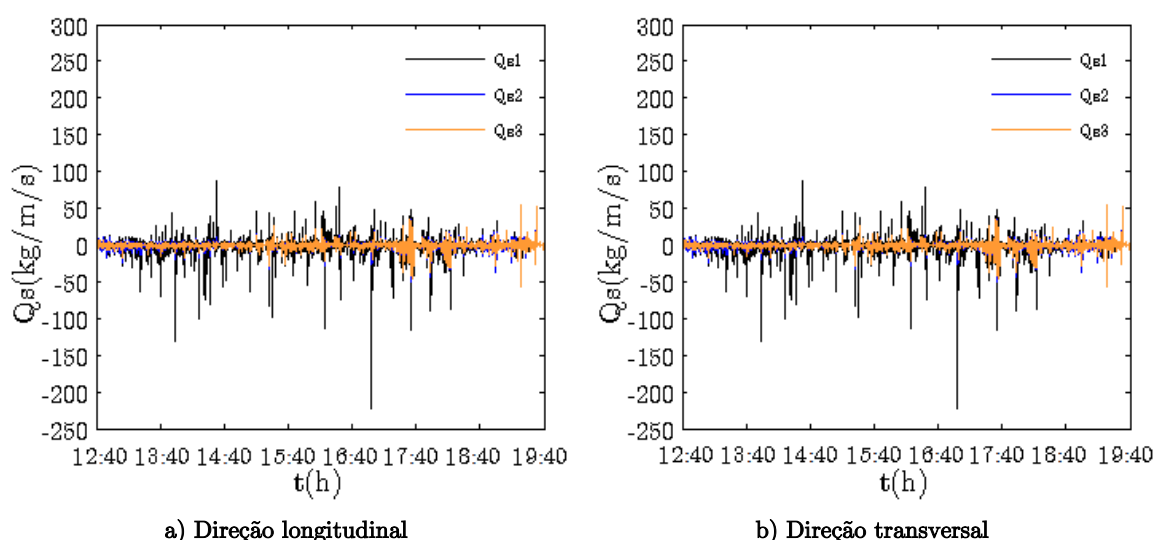


Figura 5.8 - Caudais totais, no ciclo de maré da segunda campanha

De modo a determinar mais claramente a direção do transporte longitudinal e transversal são apresentados na Figura 5.9 os valores da média do caudal a cada intervalo de dez minutos. O transporte longitudinal ocorre na direção norte-sul, sendo também perceptível que a média dos volumes que são transportados nesse sentido, são relativamente pequenas, aproximando-se de 2 kg/m/s quando o equipamento se encontra na zona de empolamento. Já o transporte transversal de sedimentos revela uma tendência no sentido negativo, também apresentando reduzidos valores de caudal sólido em suspensão.

Na zona de rebentação, o caudal sólido longitudinal em suspensão, quando não se consideram os valores registados pelo OBS superior, reduz aproximadamente 2 kg/m/s. A proximidade entre os valores de Q_{s1} e de Q_{s2} neste local, revelam que ao ser contabilizada toda a altura da coluna de água não se obtêm diferenças

significativas. Já na zona de empolamento, observa-se a aproximação dos valores de Q_{s2} e Q_{s3} . Quanto ao transporte na direção transversal, Q_{s2} e Q_{s3} não apresentam grandes divergências durante o ciclo de maré. Mais uma vez se verifica que Q_{s1} regista valores mais discrepantes do que Q_{s2} e Q_{s3} , à medida que se aproxima da zona de empolamento.

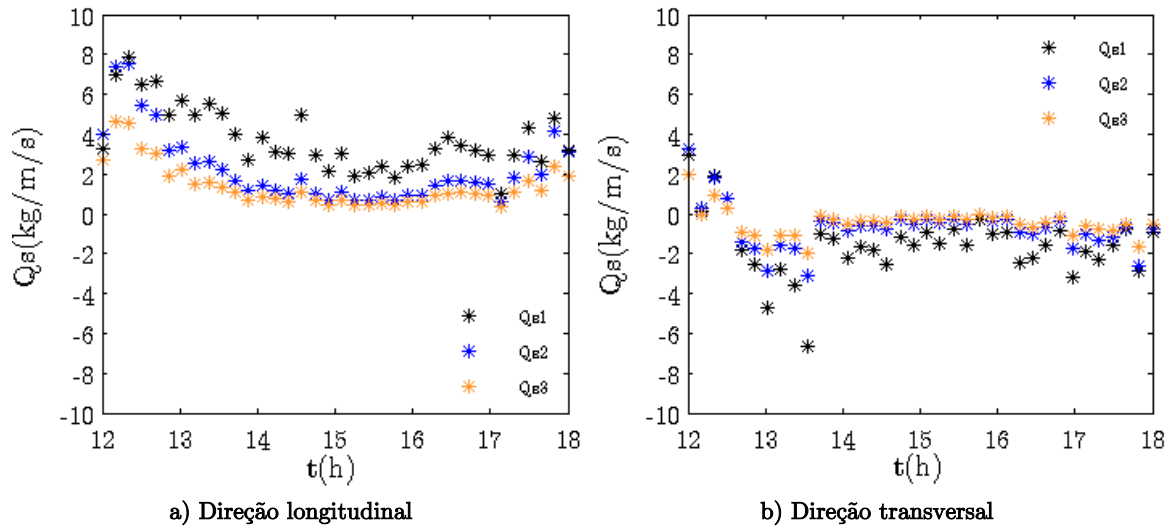


Figura 5.9 - Média a cada dez minutos do caudal integrado na coluna de água na primeira campanha

Na Figura 5.10, referente à campanha de 15/04/2014, observa-se que o transporte na direção norte-sul é muito reduzido, com valores médios a cada intervalo de dez minutos entre os -1 kg/m/s e 2 kg/m/s.

No que diz respeito ao caudal transversal, os registos variam entre os -4 kg/m/s e 0 kg/m/s, portanto com transporte na direção este-oeste. No geral tanto para o transporte longitudinal como para o transversal, verificaram-se baixos valores de caudal, exceto entre as 17 h e 18 h, pelas razões que já foram enunciadas.

Nesta figura observa-se que os valores de Q_{s2} e Q_{s3} não diferem muito entre si. Seria de esperar que os valores de Q_{s2} inicialmente fossem mais próximos de Q_{s1} e que, gradualmente se aproximassem de Q_{s3} porque a altura de influência aumenta. No entanto, este facto não se verifica nem para o transporte longitudinal, nem para o transporte transversal. O Q_{s1} apresenta predominantemente valores relativamente superiores aos apresentados por Q_{s2} e Q_{s3} , mas estes valores não aumentam significativamente à medida que se entra na zona de empolamento. Estes factos

poderão, mais uma vez, indicar que nesta campanha de campo será admissível que 60% do caudal sólido em suspensão passa na altura de influência do OBS que se encontra na posição mais elevada da coluna de água.

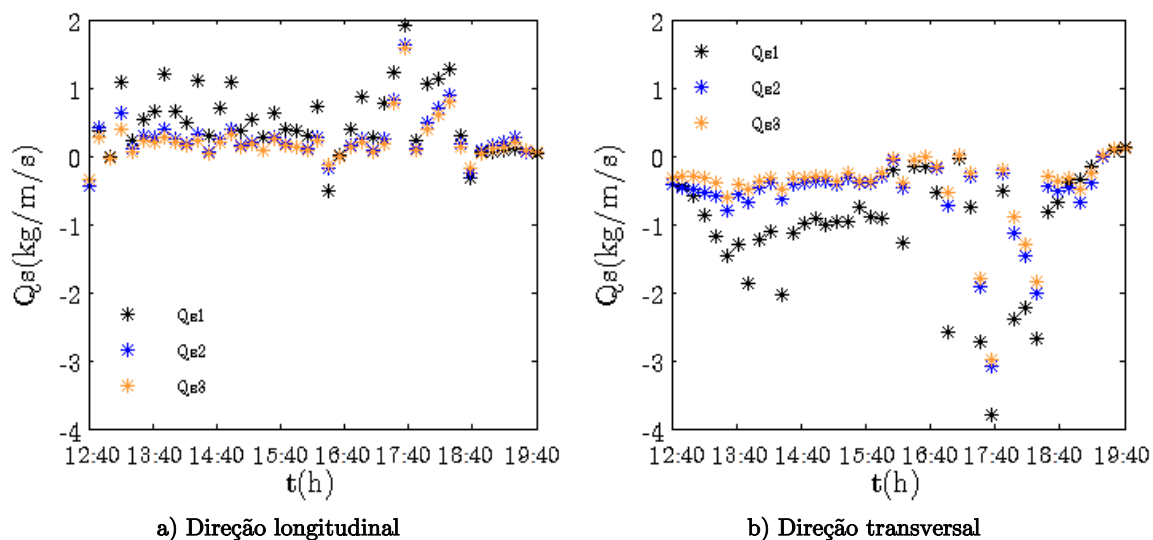


Figura 5.10 - Média a cada dez minutos do caudal integrado na coluna de água na segunda campanha

A análise presente nas Figura 5.11 e 5.12 foi realizada com o intuito de avaliar a distribuição transversal do transporte sólido longitudinal, permitindo comparar com o comportamento previsto teoricamente (Figura 2.3). Assim, foi necessário relacionar o caudal sólido em suspensão transportado ao longo de todo o ciclo de maré (incluindo os valores registados na zona de espraio) com a sua posição no perfil de praia, em função do ciclo de maré. Esta posição foi determinada através da Equação 5.1 desenvolvida por Bruun (1962).

$$h = 0.127x^{\frac{2}{3}} \quad (5.1)$$

Onde h representa a altura total da coluna de água e x a posição no perfil transversal relacionada com a evolução do ciclo de maré.

A aplicação desta análise aos dados longitudinais adquiridos durante a primeira campanha de campo pode ser observada na Figura 5.11a. Pode-se verificar que existiram dois picos de caudal, sendo que o primeiro ocorre na zona de espraio e o segundo na zona de rebentação, apesar do caudal transportado na zona de

rebetenção ser inferior ao caudal transportado na zona de espraio. Ao realizar a mesma análise ao caudal longitudinal transportado durante a segunda campanha de campo (Figura 5.11b) não se verificou nenhum pico de concentração significativo. Este resultado deve-se muito à direção da ondulação, pois não existe uma direção predominante para o transporte.

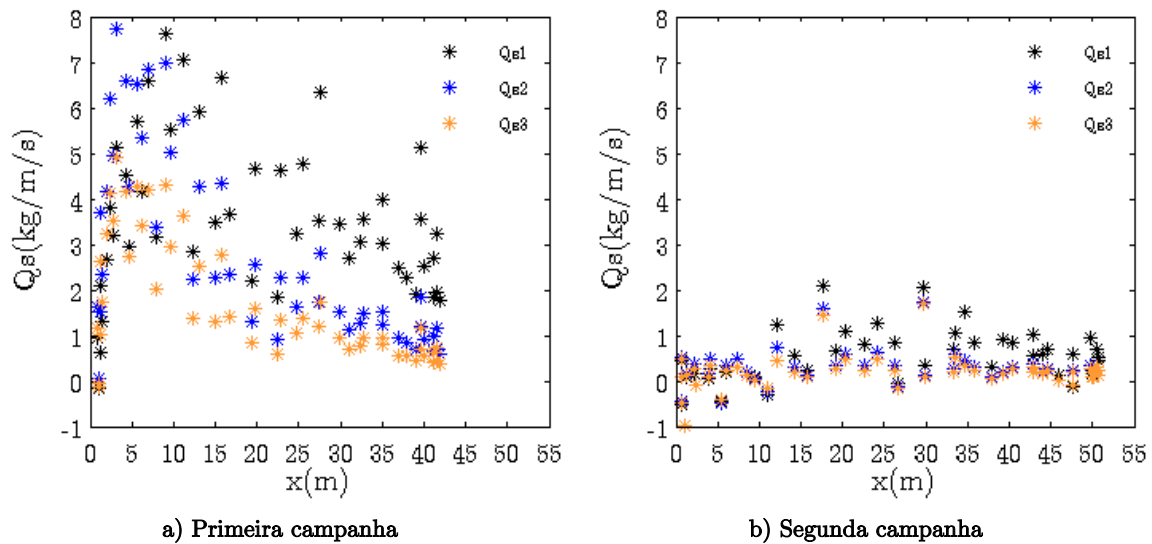


Figura 5.11 - Caudal sólido longitudinal, em função da posição do ciclo de maré

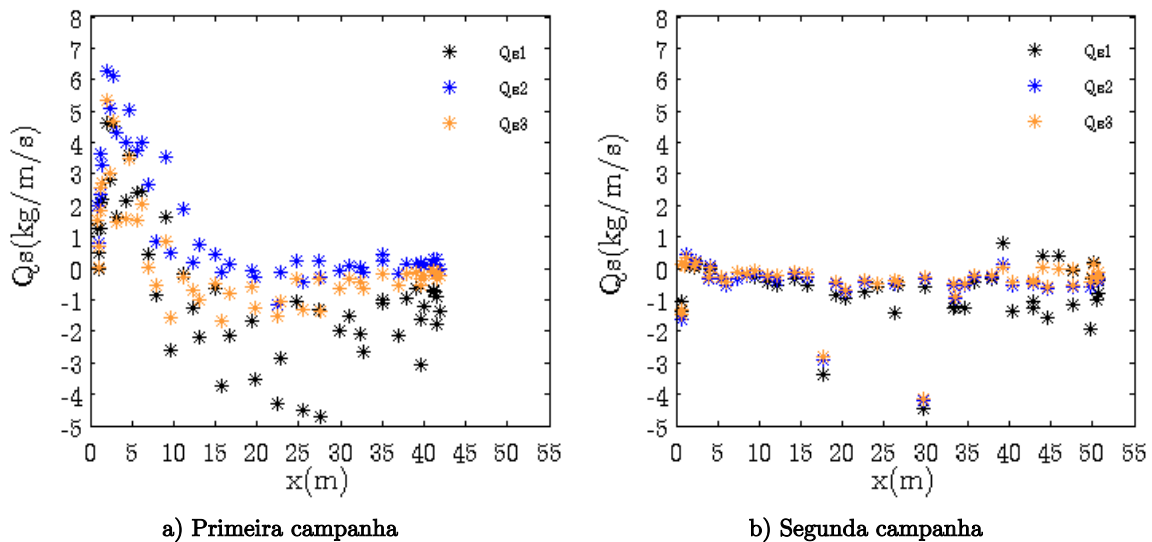


Figura 5.12 - Caudal sólido transversal, em função da posição do ciclo de maré

Na Figura 5.12 apresenta-se a análise do caudal transportado transversalmente à costa em função da sua posição no ciclo de maré. Os resultados obtidos durante a primeira campanha de campo mostram que na zona de espraio e já no fim da zona

de empolamento o transporte ocorre em direção à costa, ocorrendo na direção contrária quando se encontra na zona de rebentação (Figura 5.12a). Os resultados presentes na Figura 5.12b indicam mais uma vez que, não ocorreu praticamente transporte transversal de sedimentos em suspensão, e este transporte apresenta uma ligeira tendência para a direção este-oeste.

5.1.4.Caudais totais no ciclo de maré

Para analisar e comparar os valores obtidos em cada ciclo de maré com as formulações numéricas foi necessário converter o caudal expresso em kg/m para m³/ciclo de maré. Posteriormente, com o intuito de avaliar se os valores de caudal obtidos se enquadravam na estimativa anual de caudal sólido transportado na costa portuguesa o caudal foi convertido em m³/ano, extrapolando as condições registadas nos dias das campanhas. Considerou-se que a relação entre massa e volume segue a Equação 5.2, enunciada em Coelho (2005).

$$\frac{1}{((1-n) \times (\rho_s - \rho))} \quad (5.2)$$

Tabela 5.1 - Caudal sólido calculado nas campanhas de campo

Campanhas	Período de medição (h)	Direção longitudinal (m ³ /ciclo de maré/m)			Direção transversal (m ³ /ciclo de maré/m)		
		Q _{s1}	Q _{s2}	Q _{s3}	Q _{s1}	Q _{s2}	Q _{s3}
18/11/2013	12-18	300	180	111	-127	-56	-36
	12:40-19:40	46	23	19	-96	-51	-42
15/04/2014	12:40-17:00 e 18:00 - 19:40	39	16	12	-80	-35	-26

Na Tabela 5.1 são apresentados os valores do caudal sólido transportado em suspensão nos ciclos de maré, considerando que estes representam um metro do perfil ativo. Comparando os resultados obtidos na direção longitudinal para Q_{s1}, Q_{s2} e Q_{s3} durante a primeira campanha de campo, constata-se que de Q_{s1} para Q_{s2} o caudal sólido reduz-se quase para metade e de Q_{s2} para Q_{s3} o caudal sólido reduz-se de 30%

a 40%. No caso do caudal transversal verifica-se que de Q_{s1} para Q_{s2} se reduz mais de metade do caudal transportado e, de Q_{s2} para Q_{s3} a redução é na ordem dos 35%.

Os caudais longitudinal e transversal, que foram obtidos na segunda campanha de campo, revelam que para três alturas de influência diferentes a grandeza dos resultados permanece semelhante. No entanto, pode-se verificar que o caudal se reduz para metade de Q_{s1} para Q_{s2} e menos de metade de Q_{s2} para Q_{s3} . Constata-se ainda que o período das 17 h às 18 h para Q_{s1} tem um peso de 15%, para Q_{s2} de 30% e no caso de Q_{s3} de 36%.

Na Tabela 5.2 encontram-se os valores de caudal sólido transportado em suspensão, extrapolando para um ano as condições registadas nos trabalhos de campo e considerando que o perfil ativo da praia tem 100 m de largura.

Tabela 5.2 - Caudal sólido estimado para o total das campanhas de campo

Campanhas	Período de medição (h)	Direção longitudinal ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$)		
		Q_{s1}	Q_{s2}	Q_{s3}
18/11/2013	12-18	4393.0	2627.2	1619.7
15/04/2014	12:40-19:40	571.7	290.4	240.5
	12:40-17:00 e 18:00-19:40	472.5	191.3	141.3

Como já foi mencionado, o forte regime de ondas no litoral noroeste induz um transporte ao longo da costa para sul, de $1\text{-}2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. Na Tabela 5.2 pode-se observar que os valores de transporte longitudinal apresentados na primeira campanha de campo, são superiores aquele intervalo e que, todos os resultados obtidos na segunda campanha de campo são inferiores aquele intervalo. Estes resultados devem-se provavelmente ao facto da agitação marítima ter sido maior na primeira campanha do que na segunda.

5.2. Caudais sólidos obtidos através da aplicação de formulações

Neste subcapítulo procede-se à aplicação das formulações numéricas enunciadas no segundo capítulo, por forma a estimar o caudal sólido transportado em suspensão na Praia de Mira nos dias das campanhas de campo.

5.2.1. CERC

Como foi enunciado no segundo capítulo, para ρ foi adotado o valor de 1025 kg/m^3 , para g foi considerado o valor de 9.81 m/s^2 , o valor de γ_b foi admitido igual a 0.78, para ρ_s foi adotado o valor de 2650 kg/m^3 e o parâmetro n foi considerado igual a 0.4. O valor de H_b foi retirado da Figura 4.2 considerando o valor médio atingido pela altura significativa de onda na zona de empolamento, sendo assim adotado o valor 1.2 m para a primeira campanha de campo e o valor de 1 m para segunda campanha de campo. No cálculo do parâmetro k optou-se por utilizar a Equação 2.7, dependente do parâmetro d_{50} . Para este parâmetro foram considerados os valores recolhidos a 0 m da linha de água, a 25 m e a 50 m. Os valores de d_{50} obtidos na primeira campanha de campo foram 0.37 mm, 0.45 mm e 0.47 mm e, na segunda campanha obtiveram-se os valores 0.37 mm, 0.45 mm e 0.67 mm. Por fim, para ângulo o α_b foram considerados os trinta e seis valores centrais do período da maré (Figura 4.8), correspondendo cada um destes a uma média de dez minutos do período de registo. Estes valores variaram entre -40° e -5° na primeira campanha e, entre -40° e 20° na segunda campanha.

Tabela 5.3 - Caudais sólidos longitudinais determinados através da fórmula de CERC

Campanha	Caudal médio ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$)	Caudal máximo ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$)	Caudal mínimo ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$)
Primeira campanha de campo	5188.531	6435.049	3843.758
Segunda campanha de campo	2298.066	6387.083	28.648

Conjugando os trinta e seis valores de α_b e os três valores de d_{50} obtiveram-se cento e oito resultados para o caudal sólido transportado, apresentando-se na Tabela 5.3 apenas os valores médio, máximo e mínimo. Com base nestes resultados e comparando-os com os da Tabela 5.2 pode-se observar que os dados obtidos para a primeira campanha de campo têm a mesma ordem de grandeza, e que os valores obtidos na campanha encontram-se mais próximos do valor mínimo do que do valor médio. Já no que se refere à segunda campanha de campo, os valores médio e máximo são consideravelmente superiores aos obtidos em campo e, o valor mínimo é consideravelmente inferior. Note-se também que os valores obtidos através da

aplicação desta formulação em ambas as campanhas corroboram o facto de ter ocorrido maior transporte sedimentar na primeira campanha de campo.

5.2.2. Kamphuis

Na Tabela 5.4 encontram-se presentes os valores de caudal sólido transportado determinado através da fórmula de Kamphuis (1991). Para aplicar a formulação foi necessário fazer determinadas considerações. Tal como na fórmula de CERC, foram consideradas as alturas significativas da onda pertencentes à zona de empolamento para ambas as campanhas de campo, considerando 1.2 m para a primeira e 1 m para a segunda. Para o período do pico da onda foi considerada a seguinte relação, referida em Hughes (2005):

$$T_p = 1.15T_z \quad (5.3)$$

onde, o valor para o parâmetro T_z representa o período médio das ondas, resultado da média dos valores retirados do site do Instituto Hidrográfico (boia de Leixões). Foi considerado o valor 5.5 s para a primeira campanha e 8.9 s para a segunda. O declive da face da praia (m) foi determinado a partir dos perfis transversais que podem ser observados nas Figura 6.5 e 6.8 (Capítulo VI). Com base nos referidos perfis, obtiveram-se dez declives para a primeira campanha de campo, que variaram entre 2% e 7% e nove declives no caso da segunda, que variaram entre 2% e 6%. Por fim, tanto no parâmetro d_{50} como para o parâmetro α_b foram realizadas as mesmas considerações que na fórmula de CERC.

Assim, obtiveram-se um total de mil e oitenta resultados, dos quais resultaram os valores médio, máximo e mínimo presentes na Tabela 5.4. Realizando uma comparação entre estes valores e os caudais sólidos que foram obtidos na primeira campanha (Tabela 5.2) pode-se constatar que os valores máximo e médio são muito próximos dos obtidos. No que diz respeito à segunda campanha de campo verifica-se que os valores mínimos obtidos são muito próximos daqueles que foram obtidos em campo e os valores máximos e médios são consideravelmente superiores.

Tabela 5.4 - Caudais sólidos determinados através da fórmula de Kamphuis

Campanha	d_{50} (mm)	Caudal médio ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$)	Caudal máximo ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$)	Caudal mínimo ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$)
Primeira campanha de campo	0.45	2643.765	3466.647	469.074
	0.47	2483.901	3267.714	442.156
	0.37	2767.276	3640.511	492.600
Segunda campanha de campo	0.67	2681.155	5293.409	142.755
	0.37	3110.213	6140.499	165.599
	0.45	2961.676	5847.241	157.691

Através da observação da Tabela 5.4 pode ser constatado no que se refere aos valores médios e máximos que, esta formulação indica que terá ocorrido maior transporte sedimentar na segunda campanha do que na primeira campanha, em oposição aos resultados obtidos através da formulação de CERC e aos caudais sólidos determinados através dos dados de campo. Comparando os parâmetros que compõem as duas formulações, pode-se observar que os únicos que variam são o período de pico de onda e o declive da praia. Como o declive da praia entre a primeira e segunda campanha de campo não variou significativamente, a diferença de resultados obtidos deve ter origem no período de pico da onda.

Comparando os resultados pode-se observar que os valores máximos e médios de caudal sólido transportado em ambas as campanhas de campo são maiores para a fórmula de CERC do que de Kamphuis. Constata-se ainda que os valores obtidos na primeira campanha de campo são mais próximos dos valores obtidos através da fórmula de Kamphuis do que da de CERC.

Capítulo VI

Morfologia da praia emersa

6. Morfologia da praia emersa

Neste capítulo, com a intenção de ter mais um objeto de estudo para averiguar a dinâmica dos sedimentos na Praia de Mira, foram avaliados os levantamentos topográficos da superfície da praia emersa realizados antes e depois do ciclo de maré, em cada uma das campanhas de campo.

Para avaliar o comportamento morfodinâmico da praia subaérea foi realizada no início e no fim de cada campanha de campo um levantamento topográfico do setor em estudo. As grelhas de dados resultantes dos perfis obtidos nesses levantamentos foram posteriormente interpoladas no programa AutoCAD Civil 3D, recorrendo a dois métodos diferentes de cálculo, o método das triangulações e o método das grelhas com o objetivo de criar um Modelo Digital do Terreno (MDT) a partir do qual é possível determinar a diferença de volumes entre as superfícies inicial e final ao longo do ciclo de maré. Ambos os métodos definem a superfície de terreno, com base nos dados dos dois levantamentos. Assim, estes métodos calculam o volume tendo como base os pontos das duas superfícies e fazendo a diferença entre as elevações das duas superfícies.

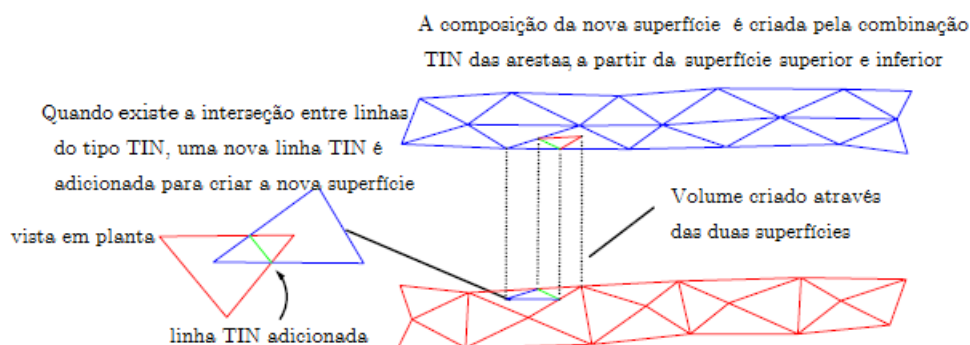


Figura 6.1 - Determinação do volume entre duas superfícies (adaptado de Autodesk, 2014)

A diferença entre o método das triangulações e o método das grelhas encontra-se na definição das superfícies. O método das triangulações presente na Figura 6.1 consegue definir toda a praia, uma vez que nos locais onde não tem pontos, cria valores através da interpolação. Já o método das grelhas (Figura 6.2), só consegue

criar grelha nos locais onde existe informação suficiente e, só realiza o cálculo do volume nos locais onde houver formação de grelha na superfície superior e inferior.

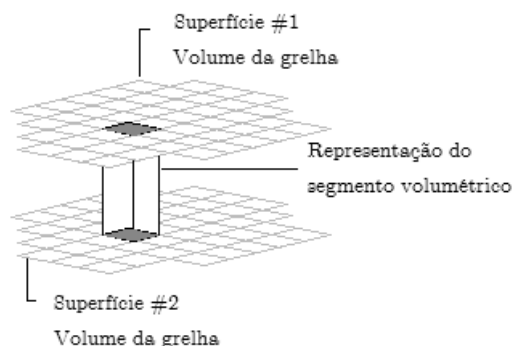


Figura 6.2 - Volume formado por superfícies do tipo grelha

6.1. Campanha do dia 18/11/2013

Nas Figura 6.3 e 6.4 podem ser observadas as superfícies que resultam dos levantamentos realizados na Praia de Mira, no período da manhã e da tarde, bem como a sobreposição das duas superfícies, para ambas as campanhas realizadas. Todos os valores obtidos baseiam-se nas zonas comuns a ambas as superfícies. Como o pico da maré ocorria de noite, por razões de segurança o segundo levantamento topográfico foi efetuado enquanto havia luz, por esta razão a superfície da manhã é mais larga do que a da tarde. A superfície monitorizada na Praia de Mira tem aproximadamente um comprimento de 4639 m e uma largura média de 132 m (este valor foi calculado realizando a média entre a largura dos perfis transversais presentes na Figura 6.5).

De acordo com os resultados obtidos pelo programa AutoCAD Civil 3D, para o método das triangulações, após o ciclo de maré da primeira campanha, uma pequena parte da Praia de Mira sofreu uma erosão de 851 m³ e houve acreção em 123281 m³. Segundo o método das grelhas, após o ciclo de maré, a superfície da Praia de Mira sofreu uma erosão de 468 m³ e uma acreção de 66305 m³ (Figura 6.2). Com estes resultados pode-se estimar que no período da campanha a praia tenha sofrido uma taxa de acreção de 0.34 m³/m² segundo o primeiro método e uma taxa acreção de 0.30 m³/m² de acordo com o segundo método referido (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 - Volumes de acreção e de erosão (campanha do dia 18/11/2013)

Método	Área (m ²)	Erosão (m ³)	Acreção (m ³)	Total (m ³)
Triangulações	365530	851	123281	122430
Grelhas	216250	468	66305	65837

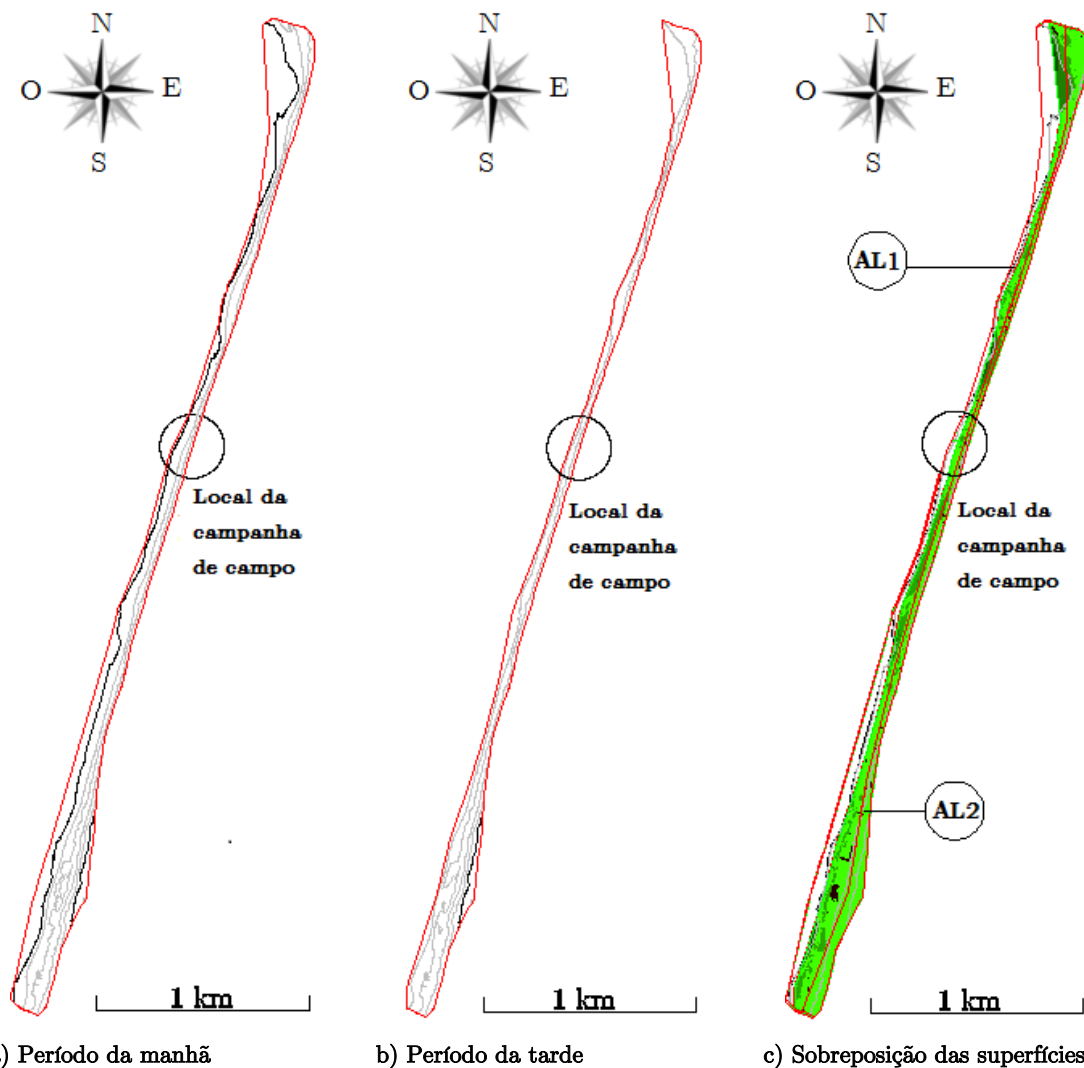


Figura 6.3 - Superfícies da Praia de Mira (campanha do dia 18/11/2013). As linhas a vermelho representam a área delimitada pelo método interpolador, a preto representam os contornos das superfícies levantadas e a cinzento as curvas de nível de 2 em 2 m. A cor verde representa a acreção e a vermelho são representados os locais onde ocorreu erosão

A Figura 6.3 apresenta o resultado dos levantamentos durante a primeira campanha de campo, considerando o método das triangulações. De forma a avaliar se a acreção ocorrida tinha sido uniforme ao longo de todo o trecho de praia, ou se havia alguma predominância no setor norte ou sul, realizou-se a divisão da área de estudo em

vários setores com extensão aproximada de 500 m. A praia foi ainda dividida a meio, por um perfil longitudinal, de forma a determinar se a acreção tinha ocorrido nos locais abrangidos maioritariamente pela zona de espraio, ou pela zona de rebentação. Estas divisões podem ser visualizadas na Figura 6.4.

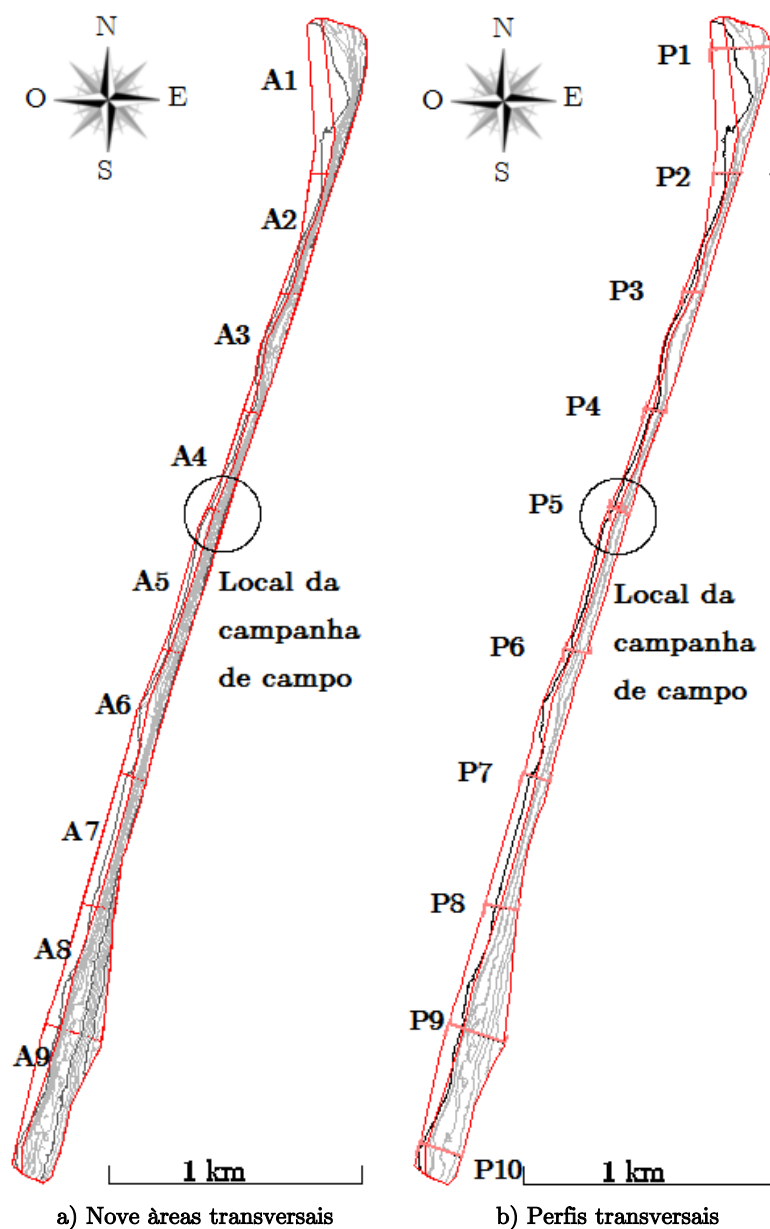


Figura 6.4 - Divisão da área de estudo (campanha do dia 18/11/2013)

Através da Figura 6.3c e da Tabela 6.2, pode-se constatar que ocorreu maior taxa de acreção na zona baixa da praia (AL1), sujeita na maior parte do ciclo de maré à rebentação, do que na zona alta (AL2), onde predomina a zona de espraio.

Os resultados obtidos para a divisão presente na Figura 6.4a permitem constatar que a acreção não foi uniforme ao longo de toda a extensão longitudinal de praia, variando a taxa de acreção entre os $0.21 \text{ m}^3/\text{m}^2$ e os $0.60 \text{ m}^3/\text{m}^2$ para o primeiro método enunciado, e entre os $0.18 \text{ m}^3/\text{m}^2$ e os $0.62 \text{ m}^3/\text{m}^2$, para o segundo método.

Tabela 6.2 - Volume de erosão e acreção divididos por trechos longitudinais (primeira campanha)

Método	Setor	Área (m^2)	Volume de erosão (m^3)	Volume de acreção (m^3)	Total (m^3)	Taxa de acreção (m^3/m^2)
Triangulações	AL1	194175	642	96124	95482	0.49
	AL2	171355	209	27157	26948	0.16
Grelhas	AL1	117469	467	50202	49735	0.42
	AL2	98621	1	16103	16102	0.16

Observando a Tabela 6.3 constata-se ainda que as maiores taxas de acreção em ambos os métodos ocorreram nos setores mais a norte. Apesar dos métodos de cálculo serem diferentes, os resultados obtidos pelo método das triangulações são muito similares aos obtidos através do método das grelhas.

Tabela 6.3 - Volumes de erosão e acreção divididos por trechos transversais (campanha do dia 18/11/2013)

Método	Setor	Área (m^2)	Volume de erosão (m^3)	Volume de acreção (m^3)	Total (m^3)	Taxa de acreção (m^3/m^2)
Triangulações	A1	63776	97	38006	37909	0.60
	A2	16799	6	5069	5063	0.30
	A3	26493	131	11888	11757	0.44
	A4	16265	63	8989	8926	0.55
	A5	29259	30	9892	9862	0.34
	A6	33157	3	14901	14898	0.45
	A7	27898	40	6222	6182	0.22
	A8	65887	75	9977	9902	0.15
	A9	85996	406	18337	17931	0.21
Grelhas	A1	44375	3	27692	27689	0.62
	A2	2471	0	706	706	0.28
	A3	11904	0.17	5209	5209	0.44
	A4	1794	0.25	1069	1069	0.59
	A5	10721	0.3	3580	3580	0.33
	A6	17027	0	7585	7585	0.44
	A7	11616	0	2478	2478	0.21
	A8	51430	16	6179	6163	0.12
	A9	64912	449	11807	11358	0.18

Na Figura 6.5 podem ser observados dez perfis transversais realizados na zona de estudo, afastados de 500 m entre si. O ponto 0+000 diz respeito à linha de costa, ou seja os perfis foram traçados de oeste para este e, os 0 m de altura correspondem ao nível médio das águas do mar. Através dos perfis transversais é perceptível que a taxa de acreção não foi uniforme ao longo de toda a largura e extensão da praia, confirmando-se também que as acreções mais elevadas ocorreram na zona norte da praia.

A observação dos perfis transversais também permite constatar que os perfis P1, P9 e P10 são os que têm maiores larguras. O declive de perfil P1 é muito mais suave que os declives dos perfis transversais P9 e P10, uma vez que estes dois atingem uma altura que varia aproximadamente entre os -2 m e os 12 m, enquanto que a altura do perfil transversal P1 varia entre os -2 m e os 6 m. Assim, os dois últimos perfis também apresentam uma morfologia diferente dos restantes perfis. Como se pode observar, entre os 0+040 m e os 0+120 m o declive da praia altera-se de forma brusca. Esta morfologia pôde ser observada durante a campanha de campo, podendo resultar da intervenção da comunidade piscatória.

Os perfis centrais apresentam larguras menores e alturas que variam entre os -2 m e os 6 m, resultando em maiores declives, estas características podem ter como consequência, a elevada variação de volume que existe entre a superfície antes e depois do ciclo de maré.

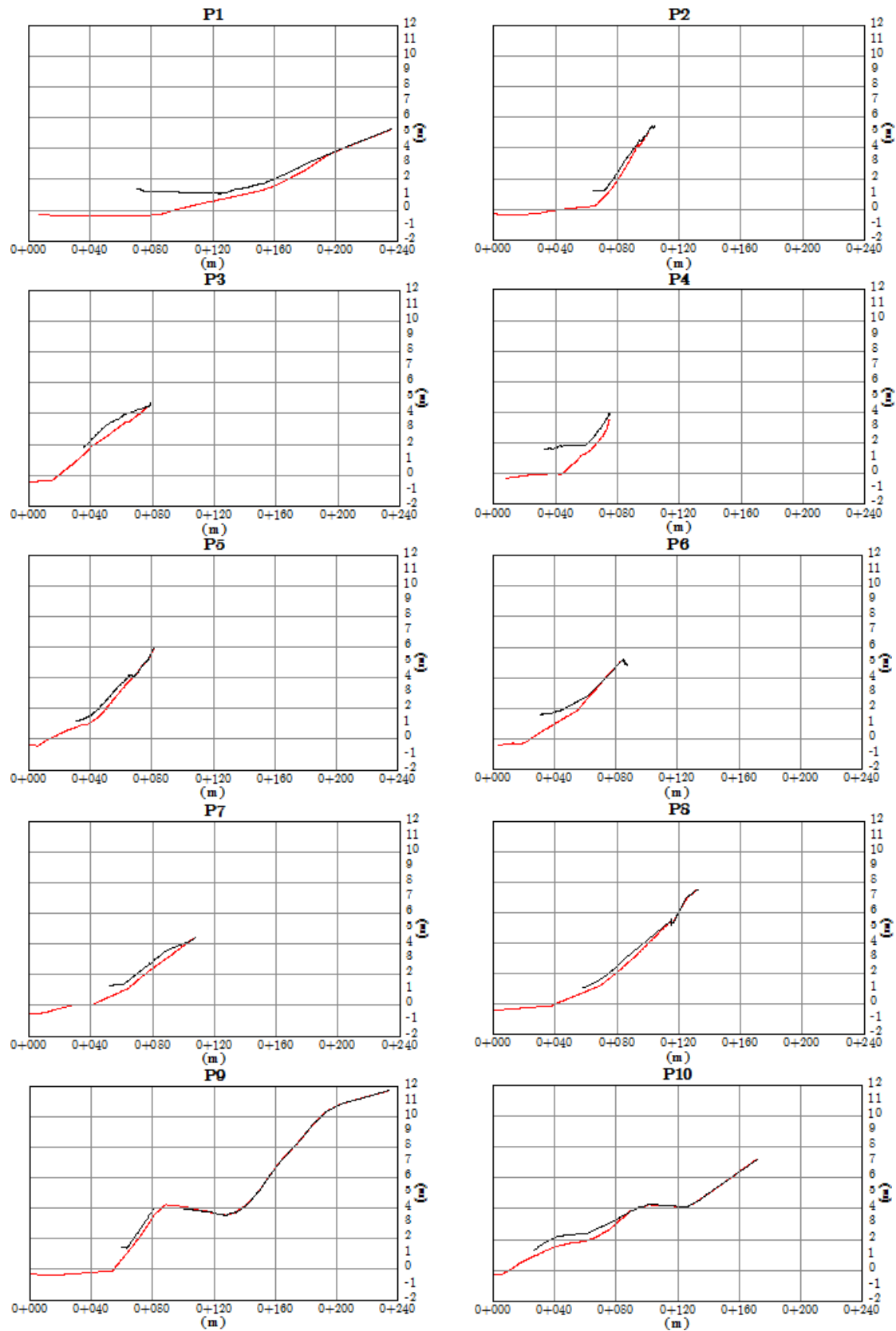


Figura 6.5 - Perfis transversais da praia (campanha do dia 18/11/2013). O vermelho representa a superfície antes do ciclo de maré e o preto representa a superfície após o ciclo de maré

6.2. Campanha do dia 15/04/2014

Na segunda campanha de campo os dois registos topográficos não foram realizados no mesmo dia como no caso anterior por questões de segurança, de forma a evitar que o levantamento fosse realizado à noite, sendo que na Figura 6.6a pode ser observado o levantamento topográfico da praia na manhã do dia da campanha, e na Figura 6.6b o levantamento da manhã do dia seguinte. A superfície monitorizada nesta segunda campanha de campo tem aproximadamente um comprimento de 4623 m e uma largura média de 134 m, calculada considerando a média entre a largura dos perfis transversais presentes na Figura 6.8.

De acordo com os resultados obtidos pelo programa AutoCAD Civil 3D para o método das triangulações tem-se que após o ciclo de maré a Praia de Mira sofreu em parte uma erosão de 44088 m³ e noutra parte uma acreção de 91665 m³, resultando num balanço total de acreção de 47577 m³, inferior aos 122430 m³ de acreção ocorridos na primeira campanha de campo. Segundo o método das grelhas, a Praia de Mira sofreu uma erosão de 27818 m³ e uma acreção de 61614 m³ (Tabela 6.4). Com estes resultados pode-se estimar que a praia tenha sofrido uma taxa de acreção de 0.081 m³/m² segundo o primeiro método e uma taxa de acreção de 0.077 m³/m², de acordo com o segundo método referido.

Como se verificou no capítulo V, os valores de transporte sólido em suspensão obtidos na segunda campanha de campo foram inferiores aos da primeira campanha. Embora não se possa relacionar de forma direta o facto de existir transporte sedimentar com a acreção ou erosão de uma praia, neste caso, ao comparar os estados marítimos em ambas as campanhas pode-se concluir que o volume de sedimentos transportados pode estar na origem da diferença de volumes de acreção uma vez que, o estado marítimo na segunda campanha de campo foi mais calmo que o da primeira. Este ganho de volume não se encontra de acordo com o transporte medido na direcção transversal porque, este não apresenta um sentido predominante.

Tabela 6.4 - Volumes de erosão e acreção (campanha do dia 15/04/2014)

Método	Área (m ²)	Volume de erosão (m ³)	Volume de acreção (m ³)	Total (m ³)
Triangulações	582138	44088	91665	47577
Grelhas	434375	27818	61614	33796

Verifica-se que a área monitorizada na segunda campanha de campo é quase o dobro da área monitorizada na primeira no entanto, obteve-se nesta campanha uma largura e comprimento médios inferiores aos da primeira campanha de campo. A origem deste valor encontra-se no facto da área comum entre a superfície antes e depois do ciclo de maré na primeira campanha ser menor do que área comum entre a superfície antes e depois do ciclo de maré na segunda campanha de campo.

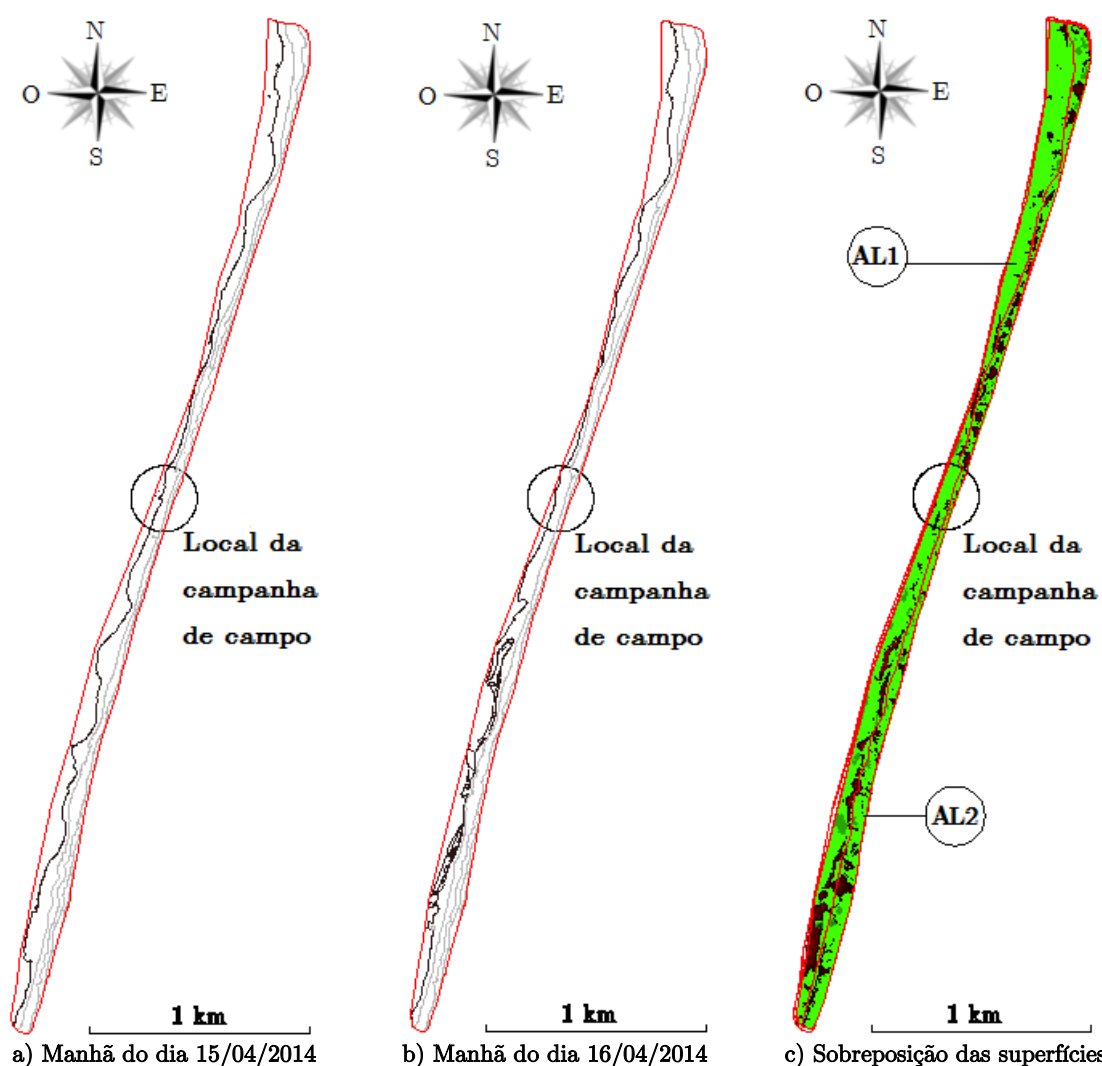


Figura 6.6 - Superfícies da Praia de Mira (campanha do dia 18/11/2013). As linhas a vermelho representam a área delimitada pelo método interpolador, a preto representam os contornos das superfícies levantadas e a cinzento as curvas de nível de 2 em 2 m

Ao ser realizada a divisão da praia em vários setores de 500 m procedeu-se novamente à avaliação da distribuição dos volumes de acreção. Para a divisão longitudinal da área monitorizada nesta segunda campanha foi utilizada a cota dos 2 m de altura, uma vez que dividia aproximadamente os perfis transversais da praia a meio, permitindo determinar se a acreção tinha ocorrido nos locais abrangidos maioritariamente pela zona de espraio ou pela zona de rebentação (Figura 6.7).

A extensão do trecho de praia monitorizada desta vez foi ligeiramente mais pequena, pelo que os cortes transversais de 500 em 500 m perfazem neste caso nove perfis transversais.

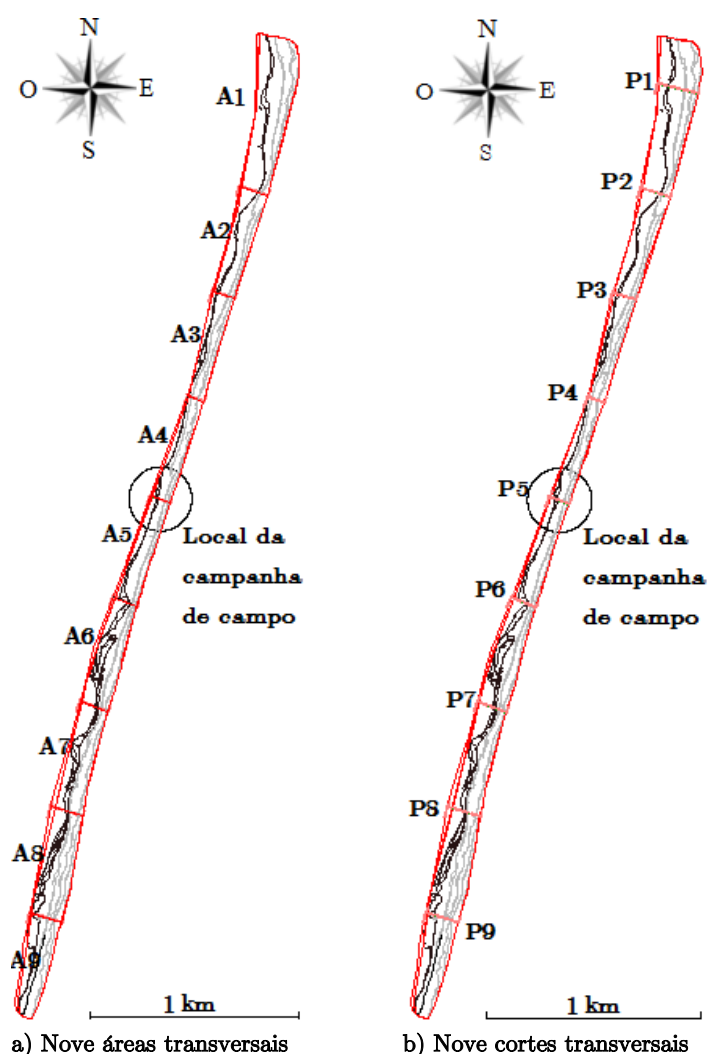


Figura 6.7 - Divisão da área de estudo (campanha do dia 15/04/2014)

Através da Figura 6.6c e da Tabela 6.5 pode-se constatar que ocorreu maior taxa de acreção na secção sujeita na maior parte do ciclo de maré à zona de rebentação. Na Figura 6.6c é possível observar vários locais onde não houve acreção ou erosão (locais a preto).

Tabela 6.5 - Volumes de erosão e acreção divididos por trechos longitudinais (campanha do dia 15/04/2014)

Método	Setor	Área (m ²)	Volume de erosão (m ³)	Volume de acreção (m ³)	Total (m ³)	Taxa de acreção (m ³ /m ²)
Triangulações	AL1	350384	30189	65428	35239	0.10
	AL2	230150	13899	26237	12338	0.05
Grelhas	AL1	280798	19256	45253	25997	0.09
	AL2	153577	8562	16361	7799	0.05

Os resultados obtidos para a divisão presente na Figura 6.6c permitem constatar que a acreção não foi uniforme ao longo de todo o trecho longitudinal de praia, variando a taxa de acreção entre os 0.01 m³/m² e os 0.16 m³/m², ocorrendo ainda erosão em A9 com uma taxa de 0.05 m³/m² para o primeiro método enunciado. De acordo com o método das grelhas, existe acreção entre os 0.01 m³/m² e os 0.17 m³/m², também com uma taxa de erosão em A9 de 0.04 m³/m². As maiores taxas de acreção, determinadas por ambos os métodos, ocorreram nas secções mais a norte e os resultados obtidos pelo método das triangulações são muito similares aos obtidos através do método das grelhas (Tabela 6.6).

Como se pode observar na Figura 6.8, não se registam grandes alterações ao longo da praia, exceto nos três últimos perfis transversais, sendo que P7 e P8 revelam a existência de erosão entre os 0+080 m e os 0+0120 m, com uma altura de aproximadamente 1 m. Já o perfil transversal P9 apresenta uma erosão considerável. As variações significativas obtidas nos perfis transversais P7, P8 e P9 devem-se provavelmente a um erro do método de interpolação ao calcular a superfície. Note-se ainda que os restantes perfis transversais não apresentam quase variações morfológicas, apresentando apenas uma ligeira acreção.

Tabela 6.6 - Método das triangulações para cada secção

Método	Setor	Área (m ²)	Volume de erosão (m ³)	Volume de acrecção (m ³)	Total (m ³)	Taxa de accreção (m ³ /m ²)
Triangulações	A1	120197	2572	21363	18791	0.16
	A2	57776	1109	8567	7458	0.13
	A3	45268	3372	4555	1183	0.03
	A4	42717	3719	8567	4848	0.11
	A5	50562	478	9506	9028	0.18
	A6	66315	7859	13045	5186	0.08
	A7	65776	7276	10436	3460	0.05
	A8	77192	9741	10616	875	0.01
	A9	56335	7962	4974	-2988	-0.05
Grelhas	A1	98173	1307	17717	16410	0.17
	A2	41932	377	6703	6326	0.15
	A3	29700	1802	2559	757	0.03
	A4	26742	1355	3593	2238	0.08
	A5	34159	27	6449	6422	0.19
	A6	50522	5691	8069	2378	0.05
	A7	48952	5342	5813	471	0.01
	A8	63469	7062	7398	336	0.01
	A9	40726	4855	3314	-1541	-0.04

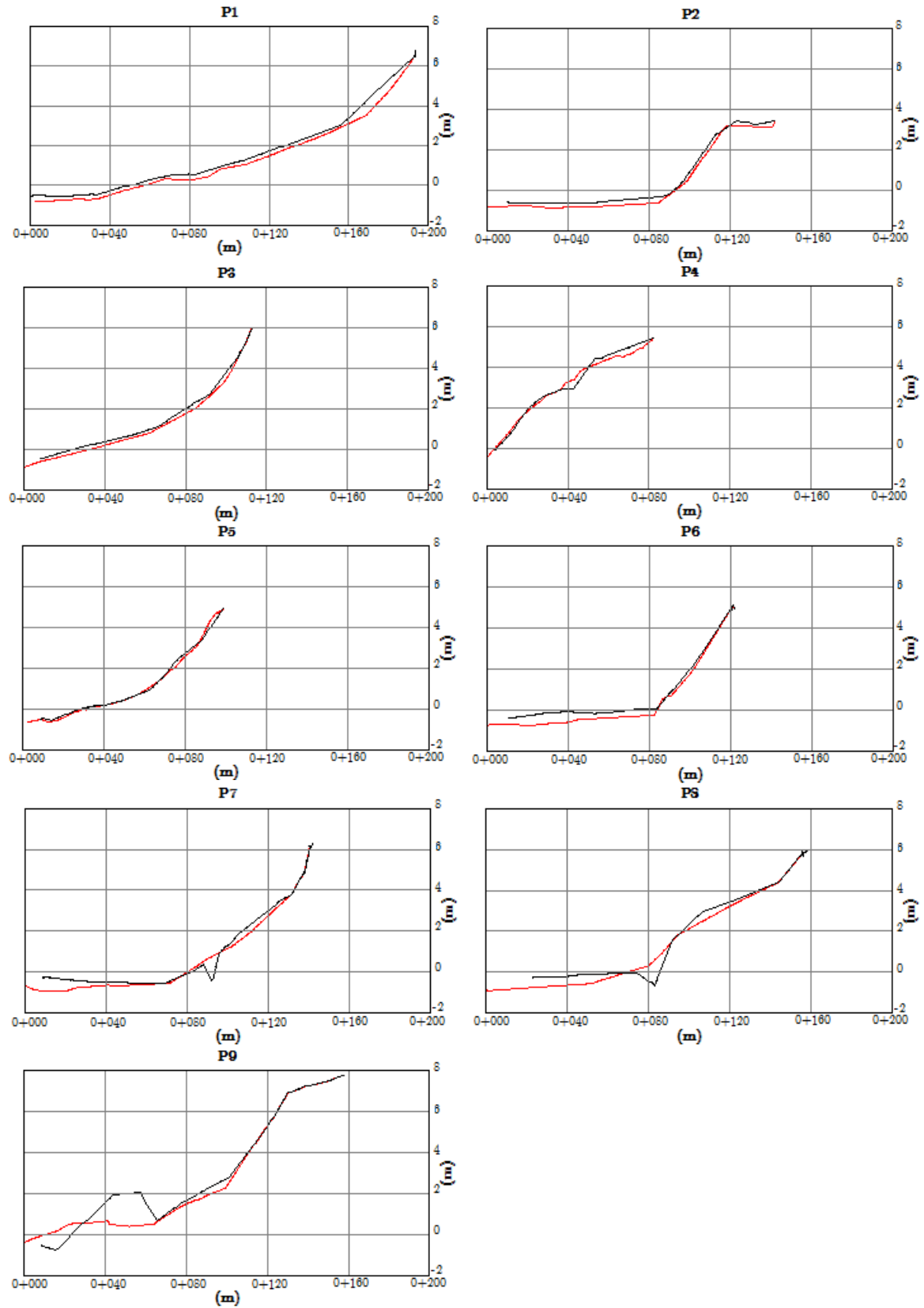


Figura 6.8 - Perfis transversais da praia (campanha do dia 15/04/2014). O vermelho representa a superfície antes do ciclo de maré e o preto representa a superfície após o ciclo de maré

Capítulo VII

Conclusão

7. Conclusão

No presente capítulo são apresentadas as principais conclusões retiradas do trabalho desenvolvido, seguindo-se a apresentação de sugestões para dar continuidade ao trabalho no futuro.

7.1. Considerações finais

O estudo da morfodinâmica e do transporte sedimentar da orla costeira é de grande importância uma vez que, aumenta o conhecimento sobre processos, que mais tarde possibilitam a criação de modelos numéricos para simulação e previsão das alterações que ocorrem. Estes modelos facilitam a tomada de decisões no que diz respeito à proteção costeira.

O presente trabalho teve como principal objetivo caracterizar a morfodinâmica e o transporte sedimentar na Praia de Mira. A revisão bibliográfica permitiu melhorar conhecimentos e as duas campanhas de campo que decorreram na Praia de Mira permitiram estimar as variáveis hidrodinâmicas, o transporte sedimentar em suspensão que ocorreu nos ciclos de maré em estudo e o caudal sólido transportado, avaliado através de formulações numéricas. Os dados obtidos nas campanhas também possibilitaram a determinação das variações volumétricas ocorridas na praia entre os ciclos de maré.

O plano da praia pode ser dividido em quatro zonas hidrodinâmicas, a zona de empolamento, a zona de rebentação externa, a zona de rebentação interna e a zona de espraio. A zona de rebentação é responsável pela maior parte do transporte sedimentar que ocorre no litoral. Nesta zona podem ser distinguidas três tipos de correntes: de fundo, de retorno e longitudinais. O transporte longitudinal de sedimentos divide-se em duas componentes, nomeadamente por arrastamento no fundo e em suspensão, podendo esta última ser determinada através da distribuição vertical da concentração dos sedimentos em suspensão (c) e da velocidade (v), realizando o produto entre estas duas quantidades e integrando-o verticalmente na

coluna de água. A medição *in situ* desse parâmetro em complemento com outras variáveis hidrodinâmicas contribui para o conhecimento do transporte sedimentar longitudinal. Abordagens empíricas como CERC (USACE, 1984) e Kamphuis (Kamphuis, 1991), podem ser utilizadas para determinar espacialmente e integrado no tempo o valor da taxa total do transporte sedimentar longitudinal. Complementarmente o estudo das alterações morfológicas na superfície da praia, com base em métodos topográficos permite definir o padrão erosivo e acrecionário ao longo de um setor em estudo.

Foi definida uma zona de estudo, a Praia de Mira, que se encontra à latitude de 40-42°N. Neste local a linha de costa faz aproximadamente um ângulo de 14° noroeste e é constituída essencialmente por areia. As ondas naquele local normalmente são provenientes de noroeste, com uma altura significativa da onda de 2-3 m e um período médio de onda ao largo de 8-12 s. O regime de ondas forte induz um transporte ao longo da costa, para sul, de $1-2 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$. A utilização de equipamento de medição permitiu gerar dados para análise do transporte sólido nos dias das campanhas de campo.

Na análise de resultados obteve-se que na primeira campanha de campo a altura da coluna de água atingiu cerca de 1.5 m e que a altura significativa da onda foi de aproximadamente 1.2 m. Através dos dados do ECM determinou-se que os ângulos de incidência das ondas variavam entre 5° e 40° em relação ao eixo y, a velocidade longitudinal variou entre os 0.2 m/s e os 0.7 m/s e a velocidade transversal entre os -0.7 m/s e os -0.2 m/s. As concentrações de sedimentos em suspensão foram de aproximadamente 100 kg/m^3 na zona de rebentação e 20 kg/m^3 na zona de empolamento. Já na segunda campanha foram obtidas alturas de coluna de água com aproximadamente 1.7 m e alturas significativas da onda de 1 m, os ângulos de incidência das ondas variaram entre -40° e os 20° em relação ao eixo y, as velocidades longitudinais variaram entre - 0.2 m/s e 0.2 m/s e as transversais entre -0.4 m/s e os 0.2 m/s. Na zona de rebentação o OBS1 em média registou valores de 30 kg/m^3 e o OBS2 de 20 kg/m^3 , já na zona de empolamento os OBS1 e OBS2 obtiveram respetivamente concentrações médias de 5 kg/m^3 e de 10 kg/m^3 . O OBS3 apresenta

um registo praticamente constante ao longo do tempo, com cerca de 10 kg/m^3 . Através da análise efetuada percebeu-se que a primeira campanha de campo decorreu num clima mais energético do que a segunda.

No estudo do transporte sólido que resulta dos valores medidos foram realizadas várias análises. Na avaliação da importância da altura de influência considerada para o OBS superior foi possível observar que quando se considera $h=0$ perde-se uma parte relevante do caudal sólido que é transportado na zona de rebentação e, quando h toma o valor máximo atingido pela altura da coluna de água a quantidade de caudal que se considera que está a passar naquela zona é exagerada. Este facto constata-se com mais facilidade na primeira campanha de campo do que na segunda porque, na primeira campanha de campo se observa claramente a diminuição do caudal sólido à medida que a altura da coluna de água aumenta. Verificou-se ainda que os valores de caudal adquiridos nas campanhas de campo estão na mesma grandeza de valores que aqueles obtidos através das formulações de CERC e de Kamphuis e, que em geral os valores obtidos através da fórmula de Kamphuis são mais próximos da estimativa obtida através dos dados das campanhas.

Na análise da morfologia da praia emersa foram utilizados dois métodos para calcular as variações volumétricas sofridas pela praia entre cada ciclo de maré, resultando em valores similares. Nas duas campanhas de campo ocorreu acreção após o ciclo de maré, com valores na ordem dos $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^2$ para a primeira campanha de campo e de $0.08 \text{ m}^3/\text{m}^2$ para a segunda.

Independentemente de eventuais deficiências no cálculo dos volumes dos setores, do ponto de vista de análise tem-se uma tendência de acreção no perfil dos instrumentos na primeira campanha e uma tendência estacionária (sem acreção ou erosão significativa) no perfil dos instrumentos na segunda campanha.

Tendo em conta o perfil topográfico da tarde da primeira campanha, que é muito curto e que não exhibe a baixa praia, admite-se a possibilidade da existência de erosão na zona inferior, e constata-se acreção na zona superior. Esta possibilidade toma consistência quando se verifica que a diferença de cota entre posição inicial de todos

os equipamentos de medição e a posição final aumentou mais de 10 cm de altura. Na segunda campanha, o correspondente perfil topográfico não mostra uma nítida acreção ou erosão.

Os resultados obtidos para os sensores usados podem ser representativos do comportamento local, mas os resultados devem ser avaliados com muita cautela sob a pena de se tentar extrapolar os resultados de um ponto de análise para o cálculo do transporte longitudinal em todo o setor (desde Poço da Cruz até Mira). Possíveis controlos morfodinâmicos locais podem perturbar a análise e só com vários pontos de amostragem de parâmetros hidrodinâmicos e de sedimentos em suspensão ao longo do setor se poderá ter uma melhor compreensão do comportamento em termos de transporte longitudinal.

7.2. Desenvolvimentos futuros

Para dar sequência ao trabalho desenvolvido, sugere-se que os trabalhos que decorreram na Praia de Mira se repitam de forma a criar uma série de dados, que mais tarde permita criar um padrão de forma a determinar se a quantidade de caudal que é transportado nesta praia contínua a ter a mesma ordem de grandeza, determinar a profundidade a partir da qual as ondas rebentam e ainda, aplicar outras fórmulas que determinem o caudal sólido transportado de forma a encontrar a que mais se adequa à Praia de Mira.

Sugere-se que se continue a estudar as alturas de influência de cada OBS de forma, a determinar a melhor representatividade de pontos na coluna de água para o cálculo do caudal sólido em suspensão, continuar a estudar a relação que existe entre a concentração de sedimentos e as zonas hidrodinâmicas, de forma a verificar a distribuição transversal do transporte sólido longitudinal.

O estudo contínuo desta faixa de costa é importante para avaliar as alterações morfológicas que estão a ocorrer, estimar a taxa de acreção ou erosão e determinar quais as alterações que os perfis de praia estão a sofrer.

Referências bibliográficas

Aagaard, T. e Masselink, G. 1999. "The Surf Zone. In, Short, A.D. (editor), Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics", John Wiley & Sons, Chichester, pp. 72-113.

Abbott J. e Francis J., 1977. "Saltation and Suspension Trajectories of Solid Grains in Water Streams", Philos. Trans., Royal Society of London, A 284: 225-254.

Ari Güner, H., Yüksel, Y., e Çevik, E., 2013. "Longshore sediment transport—field data and estimations using neural networks, numerical model, and empirical models", Journal of Coastal Research, 29(2), 311-324, Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

Autodesk, 2014 - Última consulta a 07/10/2014:

https://projectpoint.buzzsaw.com/_bz_web/danielrqueiroz/Public/HandsOnC3D2012/Download.dwn?SiteId=290722&ResourceId=149&Mode=direct&SiteName=danielrqueiroz&OriginalPath=Public%2FHandsOnC3D2012%2FHands-on+C3D+2012.pdf%3Fpublic

Bagnold R., 1966. "An Approach to the Sediment Transport Problem From General Physics", Geological Survey Professional Paper, 442-I.

Bailard, J., 1984. "A Simplified Model for Longshore Sediment Transport". ASCE, Houston, Texas, pp. 1454–1470. Citado em Mil-Homens *et al.*, 2013.

Battjes., J., 1974. "Computation of the set-up, longshore currents, run-in and overtopping due to wind-generated waves", 244p.

Batista, P., Bernardes, C. e Cunha, T., 2010. "The validation analysis of the INSHORE system—a precise and efficient coastal survey system", Springer Science Business Media B.V., 16p.

Batista, P., Cunha, T., Matias, A., Gama, C., Bernardes, C. e Ferreira, O., 2011. "New land-based method for surveying sandy shores and extracting DEMs: the inshore system", Springer Science Business Media B. V., 15p.

Bruun, P., 1962. "Sea level rise as a cause of shore erosion", Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE 88, 117–130. Citado em Rosati *et al.*, 2013.

Camenen, B. e Larson, M., 2007. "Unified Sediment Transport Formulation for Coastal Intel Application", Coastal and Hydraulics Laboratory, Engineer Research and Development Center, US Army Corps of Engineers , 248p.

Castanho, J. 1966. "Rebentação das Ondas e Transporte Litoral"; Memória n.º 275, Ministério das Obras Públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 278 p.

Coelho, C., 2005. " Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira", PhD Thesis, Universidade de Aveiro, 440 p.

Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F., e Taveira-Pinto, F. 2009. "Potential Effects of Climate Change on Northwest Portuguese Coastal Zones", ICES Journal of Marine Science, 66: pp. 1497–1507.

Costa, M., Silva, R., e Vitorino, J. 2001. "Contribuição para o estudo do clima de agitação marítima na costa portuguesa (Contribution to the knowledge of the wave climate in the Portuguese coast)", Atas das 2as jornadas portuguesas de engenharia costeira e portuária. Associação Internacional de Navegação, Sines, Portugal (in Portuguese). Citado em Coelho *et al.*, 2009.

Cruz, J. 2008. Ocean Wave Energy. "Current Status and Future Perspectives. Green Energy and Technology", Springer, Berlin. 431 pp. Citado em Coelho *et al.*, 2009.

Downing, J., 2008. "Basics of OBS and Turbidity Sensors", Campbell Scientific , INC.

Einstein, A., 1950. "The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows", Thechnical Bulletin, nº 1026, U.S.Dept.of Agricultura, Washington, USA, 74 p.

Fontoura, J., 2004. "Hidrodinâmica Costeira e Quantificação do Transporte Longitudinal de Sedimentos Não Coesivos na Zona de Surfe das Praias Adjacentes aos Molhes da Barra do Rio Grande, RS, Brasil", PhD Thesis, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, 298 p.

Fortunato, A., Oliveira, F., Oliveira, A., Sancho, F e Freire, P., 2008. "Dinâmica Fisiográfica da Orla Costeira: Estudos de Reabilitação e Proteção", Revista da Gestão Costeira Integrada 8 (1), pp. 45-63.

Hedges, 2013 - Última consulta a 24/09/2014:

<http://www.liv.ac.uk/~ec22/topics/Wave%20Breaking%20and%20Reflection.pdf>

Hughes, M., e Turner, I., 1999. "The Beachface", Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics, Edited by Andrew D. Short, University of Sydney, Australia, pp. 119 144.

Hughes, S., 2005. "Estimating Irregular Wave Runup on Rough, Impermeable Slopes", US Army Corps of Engineers, 11 p.

IH, 2014 - Última consulta a 16/04/2014:

<http://www.hidrografico.pt/previsao-mares.php>

INPI, 2014 - Última consulta a 25/11/14:

https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCEQFjAA&url=http%3A%2F%2Fservicosonline.inpi.pt%2Fpesquisas%2FGetFasciculo%3Fbole_ano%3D2011%26bole_nume%3D072%26proc_moda%3D01%26proc

_nume%3D104783&ei=MZ10VPGjDYzhavfxgMgD&usg=AFQjCNFkSCxZZsp9iy
SkrAbNEQWm8woYsA

Kamphuis, J., e Readshaw, J., 1978. "A model study of alongshore sediment transport rate. ASCE", Hamburg, Germany, pp. 1656–1674. Citado em Mil-Homens *et al.*, 2013.

Kamphuis, J., Davies, M., Nairn, R., e Sayao, O., 1986. "Calculation of littoral sand transport rate", *Coastal Engineering* 10, 1-21. Citado em Wang *et al.*, 2002.

Kamphuis, J., 1991. "Alongshore sediment transport rate", Journal of waterways, Port, coastal and ocean engineering, ASCE, 117(6), 624-641. Citado em Wang *et al.*, 2002.

Kamphuis, J., 2000. "Introduction to coastal engineering and mangement", Advanced series on ocean engineering and management - Volume 16, Queen's University, Canada, 437p.

Komar, P., e Inman, D., 1970. "Longshore Sand Transport on Beaches", Citado em Mil-Homens *et al.*, 2013.

Komar, P., 1988. "Environmental Controls on Littoral Sand Transport", Malaga. Citado em Mil-Homens *et al.*, 2013.

Maanen, B., Ruiter, J. e Ruessink, G., 2009. "An evaluation of two alongshore transport equations with field measurements", *Coastal Engineering* 56 (2009), pp. 313–319.

Mangor, K., 2004. "Shoreline Management Guidelines", DHI Water and Environment, 294p.

Mil-Homens, J., Ranasinghe, R., van Thiel de Vries, J. e Stive, M., 2013. "Re-evaluation and improvement of three commonly used bulklongshore sediment transport formulas", *Coastal Engineering* 75 (2013) pp.29–39.

Oliveira, I., 1997. "Proteger ou não proteger ou sobre a viabilidade de diferentes opções face à erosão da costa oeste portuguesa", *Coleção de ideias sobre a zona costeira de Portugal*, pp. 205–227, Associação Eurocoast-Portugal, Portugal (in Portuguese). Citado em Coelho *et al.*, 2009.

OLN - Oceanography Lecture Notes, 2013. Última consulta a 17/11/2013: <http://www.cmima.csic.es/mirror/mattom/IntroOc/lecture13.html>

Omega, 2013. Última consulta a 17/11/2013: <http://www.omega.com/prodinfo/pressuretransducers.html>

Pereira, C., 2004. "Dinâmica de Sistemas Sedimentares do Litoral Ocidental Português a sul do Cabo Espichel", Tese de doutoramento, Departamento de Geociências, Universidade de Évora. 360 p.

Rosati, J., Walton, T. e Bodge, K., 2002. "Longshore Sediment Transport", *Coastal Engineering Manual, Part III, Coastal Sediment Processes, Chapter III-2, Engineer Manual 1110-2-1100*, Morang, A. (editor), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 113 p.

Rosati, J. D., Dean, R. e Walton T., 2013. "The modified Bruun Rule extended for landward transport", *Marine geology* 340, pp. 71-81.

Schoonees, S. e Theron, K., 1994. "Accuracy and applicability of the SPM longshore transport formula", pp. 2595–2609. Citado em Mil-Homens *et al.*, 2013.

Smith, R., Wang, P., Ebersole, A. e Zhang, J., 2009. "Dependence of total longshore sedimenttransport rates on incident wave parameters and breaker type", *Journal of Coastal Research* 250 (3), 675–683. Citado em Mil-Homens *et al.*, 2013.

Svendsen, I., Madsen, P., e Hansen, J., 1978. "Wave Characteristics in the Surf Zone", Technical University of Denmark, pp. 520-539.

USACE, 1984. United States Army Corp of Engineers, "Shore Protection Manual", Washington, DC: USACE. Citado em Ari Güner *et al.*, 2013.

Valle, R., Medina, R. e Losada, M., 1993. "Dependence of coefficient k on grain size", Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 1190 (5), 568–574. Citado em Mil-Homens *et al.*, 2013.

Van Rijn, L., 1990. "Principles Of Fluid Flow And Surface Waves In Rivers", Estuaries, Seas And Oceans.

Wang, P., Ebersole, B., e Smoth, E., 2002. "Longshore Sand Transport – Initial Results from Large-Scale Sediment Transport Facility", US Army Corps of Engineers ERDC/CHL CHETN-II-46, 11p.

Wright, L. e Short, A., 1984. "Morphodynamic Variability of Beaches and Surf Zones. A Synthesis", Marine Geology, 56, pp. 93-118.

Zhang, W., Deng, J., Harff, J., Schneider, R. e Dudzinka-Nowak, 2013. "A coupled modeling scheme for longshore sediment transport of wave-dominated coasts—A case study from the southern Baltic Sea", Coastal Engineering 72 (2013), pp. 39–55.